



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

Mapeamento do regolito laterítico no centro-oeste brasileiro por sensoriamento remoto multiespectral

Lateritic regolith mapping in Midwest of Brazil by multispectral remote sensing

BÁRBARA COSTA DA SILVA

Dissertação de Mestrado N° 495

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriana Maria Coimbra Horbe

Brasília, 21/07/2022



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

Mapeamento do regolito laterítico no centro-oeste brasileiro por sensoriamento remoto multiespectral

Lateritic regolith mapping in Midwest of Brazil by multispectral remote sensing

BÁRBARA COSTA DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências – IG da Universidade de Brasília - UnB, como requisito parcial obrigatório para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de concentração: Geologia Regional

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriana Horbe

Comissão Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Júlia Barbosa Curto Ma (Interno - IG/UnB);

Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro (Externo - IGc/USP);

Prof.^a Dr.^a Tati de Almeida (Suplente interno - IG/UnB)

**Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Cm Costa da Silva, Bárbara
Mapeamento do regolito laterítico no centro-oeste brasileiro por sensoriamento remoto multiespectral / Bárbara Costa da Silva; orientador Adriana Maria Coimbra Horbe. -- Brasília, 2022.
70 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geologia) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Geologia regional. 2. Regolito laterítico. 3. Sensoriamento remoto. 4. Intemperismo. I. Maria Coimbra Horbe, Adriana, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Esta pesquisa não teria se concretizado sem o apoio direto e indireto de vários companheiros e companheiras que me incentivaram para eu chegar até esse momento.

Agradeço especialmente à Prof.^a Dr.^a Adriana Horbe pela orientação, por acreditar na minha capacidade e me incentivar. Obrigada pelo estímulo à ciência, por seu tempo e paciência.

À Universidade de Brasília - UnB pelo suporte físico e técnico. Aos professores, técnicos e servidores do Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências - IG pela oportunidade e troca de conhecimento e experiências.

Aos membros do Laboratório de Difractometria de Raios-X da UnB pelo suporte e crédito, em particular nesses tempos pandêmicos que vivenciamos.

À Prof. Deorgia Souza e Thaianne Bonfim, do Laboratório de Espectrorradiometria - PPGM/DEXA – Universidade Estadual de Feira de Santana, pelo apoio técnico.

À comissão examinadora pelo tempo e disposição. Obrigada pelas críticas e sugestões.

Agradeço à minha mãe e irmão pelo amor imensurável. Aos meus amigos por estarem presentes em todos os momentos da pós-graduação, em especial à Arielle Silva (PPGHIS) que sempre me acompanhou de perto. Às pessoas mais incríveis que tive a oportunidade de conviver, em especial, Wallace Vieira, Alessandro Igor e Pedro Silva (PPGEA). Além dos meus grandes amigos e companheiros do Clube de Cinema (Anne Caroline, Adállyda Messias, Antônio Aurivânio e João Lucas).

À equipe do MapBiomass, em especial à Articulação Institucional e ao GT Solos pela confiança e estímulo a esta pesquisa.

Àqueles que porventura tenha esquecido de mencionar, muito obrigada!

*“Parte da jornada é o fim”
- Iron Man*

RESUMO

Na região central do Brasil existe espesso manto de intemperismo desenvolvido a partir de diferentes tipos de rochas e em variadas superfícies geomórficas, com ampla ocorrência de crostas lateríticas e seus produtos. O mapeamento das unidades do regolito laterítico, especialmente as crostas lateríticas, fornece informações de grande interesse à exploração mineral e ao entendimento dos processos evolutivos das paisagens, principalmente aquelas em ambiente tropical. Ferramentas SIG, modelos matemáticos e estatísticos para processamento e análise de dados, e a computação em nuvem, representam avanços no mapeamento geológico em larga escala, incluindo informações relevantes sobre os terrenos lateríticos tropicais. Dados de sensoriamento remoto e técnicas de processamento de imagens são eficientes no mapeamento dessas superfícies, seja com o uso de composições coloridas RGB, índices espectrais e/ou análises de componentes principais. Neste trabalho, foram testados e validados três modelos matemáticos e estatísticos em imagens multiespectrais dos sensores Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI, para verificar a técnica e o sensor com melhor eficiência para o mapeamento do regolito laterítico na área de estudo: 1 - matemática de bandas, 2 - análise de componentes principais direcionada (DPCA) e 3 - sobreposição de índices. Todo o processamento e integração dos dados foram realizados na plataforma em nuvem *Google Earth Engine* e permitiu a discriminação das áreas onde afloram rochas, saprólito, mosqueado, solo e as crostas lateríticas na região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia, no centro-oeste do Brasil. Os mapas preditivos tiveram acurácia global superior à 70% e valores de k e t entre 0,5 e 0,6, indicando forte correspondência com os dados de campo. O Landsat-8 e Sentinel-2 tiveram valores de acurácia próximos, apesar do Landsat-8 apresentar melhor precisão. Isso indica que os três modelos aplicados às imagens multiespectrais OLI e MSI e validados por dados de campo, são eficientes para o mapeamento do regolito laterítico em ambiente tropical, podendo ser facilmente aplicados e testados em outras áreas de estudo.

Palavras-chave: crostas lateríticas, intemperismo, integração e modelagem de dados, métodos estatísticos, processamento em nuvem.

ABSTRACT

In the central region of Brazil there is a thick mantle of weathering developed from several types of rocks and on different geomorphic surfaces, with a wide occurrence of lateritic duricrusts and their products. The mapping of lateritic regolith units, especially lateritic duricrusts, provides information of great interest to mineral exploration and to understanding the evolutionary processes of landscapes, especially those in a tropical environment. GIS tools, mathematical and statistical models for data processing and analysis, and cloud computing represent advances in a large-scale geological mapping, including relevant information on tropical lateritic terrains. Remote sensing data and image processing techniques are efficient in mapping these surfaces, whether using RGB color composites, spectral indexes and/or principal component analyses. In this work, three mathematical and statistical models were evaluated and validated in multispectral images from Landsat-8 OLI/TIRS and Sentinel-2 MSI sensors, to verify the technique and sensor with the best efficiency for mapping the lateritic regolith in the study area: 1 - band math, 2 - directed principal component analysis (DPCA) and 3 - index overlay. All data processing and integration were performed on the Google Earth Engine cloud platform and allowed the discrimination of areas where rocks, saprolite, mottled, soil and lateritic duricrusts outcrop in the region of the states of Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais and Bahia, in the Midwest of Brazil. The predictive maps had an overall accuracy greater than 70% and k and t values between 0.5 and 0.6, indicating a strong correspondence with the field data. Landsat-8 and Sentinel-2 had similar accuracy values, although Landsat-8 had better accuracy. This indicates that the three models applied to OLI and MSI multispectral images and validated by field data are efficient for mapping lateritic regolith in a tropical environment and can be easily applied and evaluated in other areas of study.

Keywords: lateritic duricrusts, weathering, data integration and modeling, statistical methods, cloud processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

Figura 1. Comparação entre terminologias das unidades do regolito laterítico.	5
Figura 2. Comportamento espectral dos principais minerais presentes no regolito laterítico e disposição das principais bandas do Landsat-8 OLI/TIRS.	7
Figura 3. Comportamento espectral dos principais minerais presentes no regolito laterítico e disposição das principais bandas do Sentinel-2 MSI.	8
Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.	12
Figura 5. Mapa geológico simplificado da área de estudo	13
Figura 6. Mapa geomorfológico simplificado da área de estudo.	16

CAPÍTULO II

Figura 7. Fluxograma do processamento aplicado às imagens Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI23	
Figura 8. Mapa geológico simplificado da área de estudo.	28
Figura 9. Perfil laterítico completo típico da área de estudo.	29
Figura 10. A, B e C: feições das paisagens dos domínios geomorfológicos ii, v e vi; D: vista do perfil de latossolo e linha de pedra; E: vista das concreções ferruginosas soltas sobrepostas por latossolo no topo; F: perfil de neossolo e rocha; G, H e I: textura das crostas lateríticas.	30
Figura 11. Difrátogramas de raios-X (DRX) das crostas lateríticas e de solo da área de estudo.	31
Figura 12. Classificação das crostas lateríticas usando diagrama de $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	32
Figura 13. A: Curvas de refletância espectral das crostas lateríticas e solo.	33
Figura 14. Resultados das matemáticas de bandas.	35
Figura 15. Resultados da análise de componentes principais direcionada (DPCA).	37
Figura 16. Resultados da sobreposição de índices (IOM).	41

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Características técnicas do Sentinel-2 MSI e Landsat 8 OLI/TIRS.	7
---	---

CAPÍTULO II

Tabela 2. Valores de média (\bar{X}) e desvio padrão (σ) dos histogramas das imagens derivadas da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em dados Landsat-8 e Sentinel-2.	25
Tabela 3. Composição química dos elementos majoritários e LOI em crostas lateríticas e solo, expressos em %.....	30
Tabela 4. Matriz de autovetores e autovalores derivada da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em imagens Landsat-8.	36
Tabela 5. Matriz de autovetores e autovalores derivada da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em imagens Sentinel-2.	38
Tabela 6. Matriz de confusão para os mapas preditivos do regolito elaborados a partir das matemáticas de bandas, DPCA e IOM, derivados de imagens Landsat-8 OLI/TIRS.	39
Tabela 7. Matriz de confusão para os mapas preditivos do regolito elaborados a partir das matemáticas de bandas, DPCA e IOM, derivados de imagens Sentinel-2 MSI.	39
Tabela 8. Valores de classificação gerados pela equação 1 e área do mapeamento preditivo IOM com Landsat-8.	40
Tabela 9. Valores de classificação gerados pela equação 1 e área do mapeamento preditivo IOM com Sentinel-2.	40

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. APRESENTAÇÃO	2
2. INTRODUÇÃO	2
3. OBJETIVOS	4
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4.1. Características do regolito laterítico.....	4
4.2. Sensoriamento remoto para estudo do regolito laterítico	6
4.3. Métodos baseados em sensoriamento remoto e novas tecnologias	8
5. ÁREA DE ESTUDO	11
5.1. Características gerais.....	11
5.2. Geologia regional	12
5.3. Geomorfologia regional	16
CAPÍTULO II	18
1. INTRODUÇÃO	19
2. FONTE DE DADOS E PROCESSAMENTO	21
2.1. Dados multiespectrais	21
2.2. Métodos para o mapeamento do regolito laterítico.....	22
2.3. Validação dos resultados.....	25
2.4. Análises das amostras de campo.....	26
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.1. Descrição do regolito laterítico	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1. Características espectrais da área de estudo.....	32
4.2. Mapeamento regolito laterítico em escala regional	34
5. CONCLUSÕES	42
AGRADECIMENTOS	43
REFERÊNCIAS	43
CAPÍTULO III	50
CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

CAPÍTULO I

1. APRESENTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em três capítulos. O capítulo I compreende a introdução, os objetivos, fundamentação teórica e aspectos da área de estudo. O capítulo II é o artigo elaborado a partir desta dissertação, descrevendo os materiais e métodos, resultados, discussões e conclusões obtidas com este trabalho. O capítulo III apresenta as considerações finais.

2. INTRODUÇÃO

O regolito remete às rochas fisicamente e, em geral, quimicamente alteradas. É formado por processos intempéricos, erosivos, deposicionais e/ou de transporte. Inclui as rochas do embasamento, saprólito, mosqueado, solos, acumulações orgânicas e outros sedimentos (Scott e Pain, 2009). Perfis de regolito profundamente intemperizados são comuns na faixa intertropical, entre as latitudes 35°N e 35°S, com espessuras variáveis e dependente da atividade tectônica, história climática e natureza da rocha (Tardy e Roquin, 2000; Anand e Paine, 2002). Podem ser encontrados *in situ*, mais comuns na faixa tropical, ou transportados. A erosão diferencial, deposição e as alterações químicas adicionam complexidade aos perfis de regolito, para além da simplificação de “manto de produtos do intemperismo”.

Em regiões tropicais, se forma o regolito laterítico, ou seja, quando é possível a observação em larga escala de crostas lateríticas, localizadas próximo à ou na superfície (Scott e Pain, 2009). Também denominadas por “resíduo laterítico”, as crostas lateríticas são resultado da acumulação de óxidos e hidróxidos de Fe e Al ou SiO₂ e compreendem a parte endurecida no topo dos perfis lateríticos completos. Podem ter textura maciça, vermiforme ou, mais comumente, conter várias segregações secundárias tais como nódulos, pisólitos e oólitos (Anand et al., 2002). As crostas lateríticas compõem uma superfície endurecida e sustentam o regolito laterítico tendo em vista sua maior resistência à erosão (Costa, 2007).

Na maioria do território brasileiro, há a formação de crostas lateríticas em decorrência das condições climáticas tropicais e semiáridas, além da relativa estabilidade tectônica, combinadas com a complexidade dos terrenos geológicos. Os platôs com crostas lateríticas se estendem para além dos limites da Amazônia, até regiões como o norte de Minas Gerais e o Planalto Central (nos estados do Distrito Federal e Goiás) (Costa, 2007). O regolito laterítico da região amazônica é bem descrito (Costa, 1991; Costa, 1993; Araújo, 1994; Costa et al., 1996; Horbe e Costa, 1999; Riker et al., 2008; Santos, 2011; Albuquerque, 2015; Castro et al., 2016; Iza, 2017; Albuquerque, 2018; Hurtado, 2018), enquanto o centro-oeste do Brasil carece de estudos mais aprofundados (Belcher, 1954; Novaes Pinto, 1994; Martins, 1991; Martins, 2000;

Palermo et al., 2000; Silva, 2008; Nascimento, 2011; Lima, 2017). Além disso, mapeamentos nessa região são mais escassos (CPRM, 2000; Souza et al., 2021; Peixoto et al., 2021).

Mapas acurados do regolito laterítico melhoram a compreensão dos processos de intemperismo, erosão e deposição, além de serem cruciais para exploração e pesquisas minerais (Wilford, 2014; Cudahy et al., 2016; De Boissieu et al., 2018). Vários protocolos para mapeamento do regolito laterítico foram desenvolvidos nas últimas décadas (Butt, 2016), em especial com uso de técnicas matemáticas e estatísticas para modelagem de informações geográficas e de sensoriamento remoto (Arhin e Nude, 2009; Wilford e Thomas, 2013; Arhin et al., 2015; Iza et al., 2018; Assis et al., 2021). Para mapear o regolito laterítico e suas expressões na paisagem, diferentes dados podem ser integrados, como por exemplo mapas geológicos, geoquímicos, geofísicos, modelos digitais de terreno e imagens de sensoriamento remoto (Butt, 2004; Chevrel et al., 2012; Farooq e Govil, 2014; Grimaud et al., 2015; Augustin, 2016; Cudahy et al., 2016; Iza et al., 2018; Metelka et al., 2018; Caruso et al., 2018; Tripathi e Govil, 2020). Um dos métodos para mapeamento, com melhor custo-benefício, envolve técnicas e dados de sensoriamento remoto (Wilford e Creasey, 2002; Papp e Cudahy, 2002).

O advento do sensoriamento remoto facilitou a rápida caracterização e mapeamento dos materiais terrestres, incluindo rochas e minerais espectralmente sensíveis na faixa do visível ao infravermelho (Augustin, 2017). Dentre os diversos sensores multiespectrais, o Landsat-8 OLI/TIRS e o Sentinel-2 MSI se destacam com imagens gratuitas e de cobertura global, além do uso consolidado para o mapeamento de feições espectrais relacionadas à hematita, goethita e caulinita (Sabins, 1999; Deller, 2006; van der Meer et al., 2012; van der Werff e van der Meer, 2015; Saibi et al., 2018; Ge et al., 2020). Com a identificação desses minerais, é possível mapear as unidades do regolito laterítico, como o saprólito e as crostas lateríticas (Wilford e Creasey, 2002; Augustin, 2011; Arhin et al., 2015; Langford, 2015; Augustin, 2017; Ibrahim et al., 2018; Metelka et al., 2018; Tripathi e Govil, 2020; Caruso et al., 2020; Souza et al., 2021).

Dada a importância do regolito laterítico para compreensão de processos supergênicos, e evolução geomorfológica e pedológica das paisagens, além da necessidade de avanço no mapeamento e estudo desses terrenos lateríticos, essa dissertação apresenta o potencial uso do sensoriamento remoto multiespectral para o mapeamento do regolito laterítico na região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia, centro-oeste do Brasil. É, portanto, uma contribuição ao uso de imagens satelitárias multiespectrais associadas a modelos matemáticos e estatísticos para a compreensão do regolito laterítico no Brasil central.

3. OBJETIVOS

A proposta deste trabalho é empregar dados e técnicas em sensoriamento remoto multiespectral para o mapeamento regional do regolito laterítico na região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia. Dentre os específicos, listam-se:

- a) Determinar as características ópticas dos horizontes do regolito laterítico;
- b) Verificar os melhores dados e técnicas em sensoriamento remoto multiespectral para o mapeamento do regolito laterítico;
- c) Determinar as áreas de ocorrência das unidades do regolito laterítico, em especial das crostas lateríticas ferruginosas;
- d) Avaliar a aplicabilidade de imagens multiespectrais como insumo ao mapeamento do regolito laterítico em escala regional.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Características do regolito laterítico

A evolução do regolito laterítico depende da rocha-mãe, tempo de exposição, clima e desenvolvimento da rede de drenagem (Beauvais, 1999; Anand e Paine, 2002). As unidades do regolito laterítico recebem diferentes terminologias, como mostra a figura 1. Neste trabalho, foi adotada a terminologia definida por Anand e Butt (1988), Anand et al. (1989) e Eggleton (2001). Um perfil completo e preservado do regolito laterítico compreende a rocha-mãe fresca ou pouco alterada na base, graduando para o saprólito comumente esbranquiçado em direção ao topo. Este, é sobreposto por uma zona rica em argila e/ou quartzo, uma zona mosqueada e um resíduo laterítico. É na base do saprólito que se forma a frente de intemperismo (Anand et al., 2002; Costa, 2007; Retallack, 2010). Dada as dinâmicas da paisagem, o regolito laterítico está exposto parcial ou totalmente, podendo aflorar a rocha-mãe fresca e/ou seus produtos de transformação: saprólito, mosqueado, crosta laterítica e solo (Anand e Paine, 2002).

O regolito laterítico pode se formar a partir de diferentes tipos de rochas (Scott e Paine, 2009). O saprólito é dividido em saprólito grosso (*saprock*) e o saprólito fino (*saprolite*). O saprólito grosso representa a rocha-mãe ligeiramente intemperizada, enquanto o saprólito fino marca a alteração química mais expressiva, pois a maioria dos minerais foi transformada em caulinita, goethita e hematita (Anand e Paine, 2002; Anand et al., 2002; Scott e Pain, 2009). O horizonte mosqueado é marcado pela formação de segregações macroscópicas constituídas, principalmente, por caulinita, quartzo e óxi-hidróxidos de ferro (Costa, 2007; Scott e Pain, 2009). O resíduo laterítico corresponde ao horizonte superior ferruginoso, incluindo as crostas lateríticas. São compostas predominantemente por óxidos e óxi-hidróxidos de ferro (goethita,

hematita, maghemita), hidróxidos de alumínio (gibbsita e boemita) e argilominerais (caulinita e esmectita), com ou sem quartzo e pobres em Si, K, Ca, Na e Mg, quando comparado ao material de origem (Costa, 1997; Costa, 2007; Espíndola e Daniel, 2008; Scott e Pain, 2009; Nascimento, 2011). Os solos podem capear o regolito laterítico, seja em perfis completos ou em unidades expostas de perfis truncados (Anand et al., 2002; Costa, 2007; Scott e Pain, 2009).

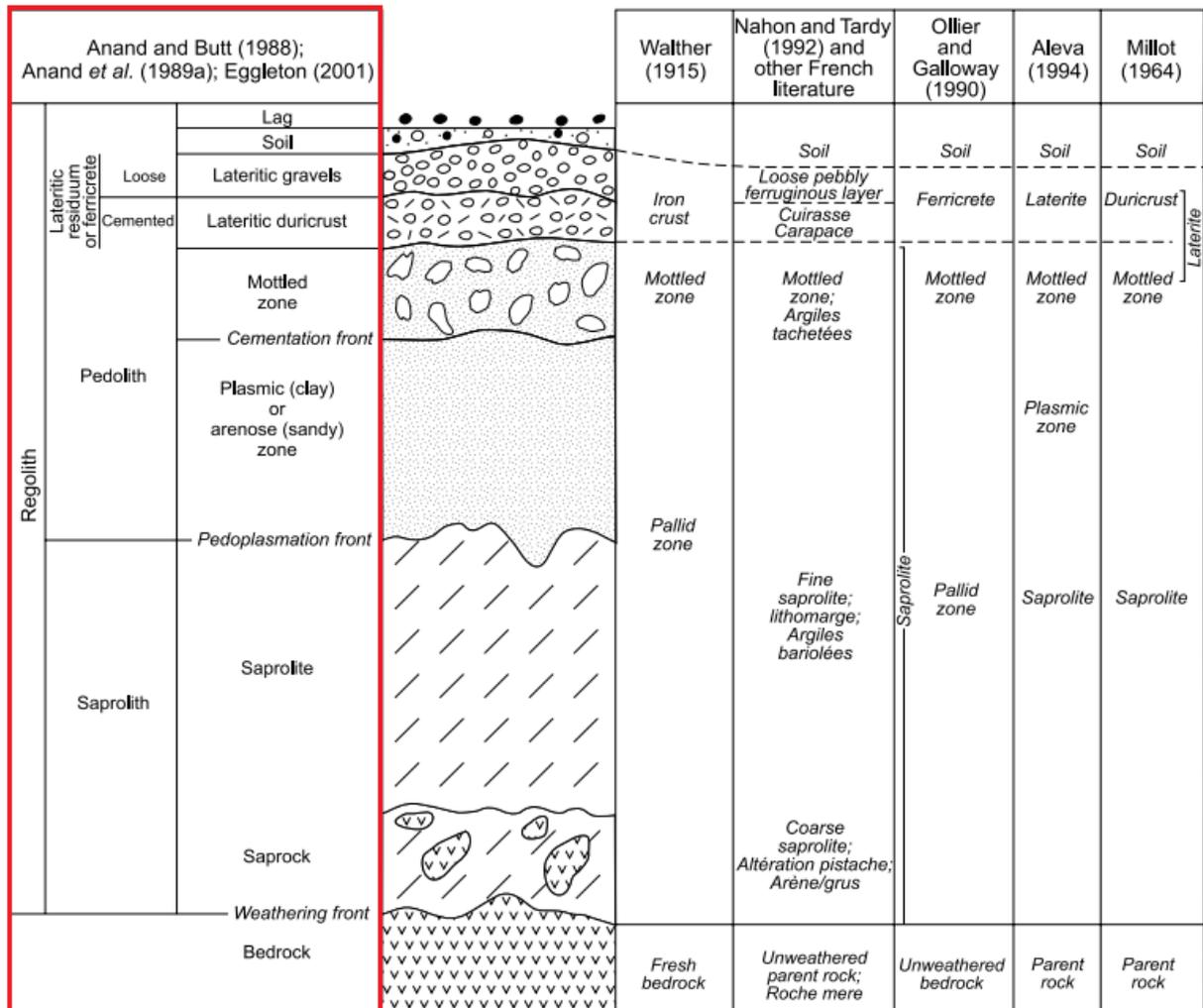


Figura 1. Comparação entre terminologias das unidades do regolito laterítico (Walther, 1915; Millot, 1964; Anand e Butt, 1988; Anand et al., 1989; Ollier e Galloway, 1990; Nahon e Tardy, 1992; Aleva, 1994; Eggleton, 2001).

Tendo em vista as características estruturais, texturais, mineralógicas e químicas, o regolito laterítico têm grande importância às geociências e às atividades econômicas da sociedade. Os perfis podem conter mineralizações de ouro, alumínio, manganês e níquel, além de terem uso consolidado para construção civil e indústrias, para o reconhecimento de zonas de enriquecimento supergênicos e a formação de reservas de metais nativos como Fe, Au e Pt, óxi-hidróxidos de Al e resistatos. São também testemunhos de eventos paleoclimáticos e evolução das paisagens (Costa, 1997; Latrubesse e Carvalho, 2006; Deller, 2006; Espíndola e Daniel,

2008; Augustin et al., 2014). A identificação e o mapeamento regional destes perfis são cruciais para a exploração mineral em ambientes tropicais, além de serem importantes para a pedologia, atividades agrícolas e de uso do solo (Pain et al., 2001; Sawadogo et al., 2020).

4.2. Sensoriamento remoto para estudo do regolito laterítico

O sensoriamento remoto é a ciência de aquisição, processamento e interpretação das características físicas de um alvo, detectadas a partir da interação entre a matéria e a radiação eletromagnética (REM). Essa interação é registrada em imagens e dados, normalmente adquiridos por satélites ou aeronaves, mas não exclusivamente (Sabins, 1999; Gibson, 2013). Sejam adquiridos por sensores ópticos passivos ou por sensores ativos, as imagens e dados de sensoriamento remoto têm diversas aplicações, especialmente para as geociências. São eficientes, por exemplo, em mapas preditivos de ocorrência mineral, de domínios litológicos e para entendimento dos processos geológicos na paisagem (Harris et al., 2011). Imagens multiespectrais e hiperespectrais, de sensores ópticos passivos, associadas a dados multifontes, facilitam a discriminação dos materiais geológicos, dentre eles as unidades do regolito laterítico (Deller, 2006; Farooq e Govil, 2014; Arhin et al., 2015).

Os sensores Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI são sistemas ópticos multiespectrais com imagens que abrangem os comprimentos de ondas de 400 a 2500 nm, incluindo do visível (VIS) ao infravermelho de ondas curtas (SWIR), além do *Red Edge* no sensor MSI e o termal no sensor TIRS. No Landsat-8, as bandas 2, 3, 4 e 5 correspondem à faixa do VNIR (visível ao infravermelho próximo) e as bandas 6 e 7, à faixa do SWIR. No Sentinel-2, as bandas 2, 3, 4 e 8 abrangem a faixa do VNIR, enquanto as bandas 11 e 12, do SWIR (tabela 1). Estes sensores permitem o mapeamento de minerais espectralmente sensíveis no VNIR, SWIR e termal, a exemplo dos minerais de AlOH, MgOH, FeOH, óxi-hidróxidos de Fe e quartzo (Sabins, 1999; Augustin, 2017; van der Werff e van der Meer, 2016). Esses minerais estão presentes nas crostas lateríticas, solos e saprólito, e a identificação destes auxilia no mapeamento do regolito laterítico (Wilford e Creasey, 2002; Lau et al., 2003; Augustin, 2011; Langford, 2015).

As feições espectrais dos minerais ferrosos, ferro férrico e óxi-hidróxidos de ferro, como magnetita, hematita, goethita e limonita, ocorrem na faixa do VNIR em torno de 400 a 1200 nm (Sherman e Waite, 1985; Rockwell e Hofstra, 2008; Augustin, 2011). As bandas 2 e 4 do Landsat 8 e do Sentinel 2 são adequadas para identificação destes minerais (figuras 2 e 3). As feições dos minerais hidratados (OH, H₂O e Al–OH), como os argilominerais 1:1, silicatos, carbonatos e sulfatos, ocorrem do infravermelho próximo ao de ondas curtas em torno de 1300–1450 nm, 1179–2060 nm e 2105–2240 nm (Augustin, 2011; Mazhari et al., 2017). As bandas 6

e 7 do Landsat 8 e bandas 11 e 12 do Sentinel 2 são adequadas para identificação destes minerais hidratados (figuras 2 e 3). A vegetação tem feições de absorção na faixa do visível e de reflexão no *Red Edge* e NIR, devido às características espectrais da clorofila e de água nas folhas (Rousse et al., 1973). As figuras 2 e 3 mostram as feições espectrais desses minerais, disponíveis na biblioteca espectral do *Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA)* (Hunt e Salisbury, 1970; Swayze e Clark, 1995; Clark e Rencz, 1999).

Tabela 1. Características técnicas dos satélites Sentinel-2 MSI e Landsat 8 OLI/TIRS.

Sentinel-2 MSI				Landsat-8 OLI/TIRS			
Banda	Descrição	Comp. Onda (nm)	Resolução (metros)	Banda	Descrição	Comp. Onda (nm)	Resolução (metros)
1	Aerossol	421 - 457	60	1	Costal	435 - 451	30
2	Azul	439 - 535	10	2	Azul	452 - 512	30
3	Verde	537 - 582	10	3	Verde	533 - 590	30
4	Vermelho	646 - 685	10	4	Vermelho	636 - 673	30
5	<i>Red Edge 1</i>	694 - 714	20	5	NIR	851 - 879	30
6	<i>Red Edge 2</i>	731 - 749	20	6	SWIR 1	1566 - 1651	30
7	<i>Red Edge 3</i>	768 - 796	20	7	SWIR 2	2107 - 2294	30
8	NIR	767 - 908	10	8	Pancromática	500 - 680	15
8A	Red Edge 4	848 - 881	20	9	Cirrus	1360 - 1380	30
9	Vapor d' água	931 - 958	60	10	TIRS 1	10600 - 11190	100
10	Cirrus	1338 - 1414	60	B11	TIRS 2	11500 - 12510	100
11	SWIR 1	1539 - 1681	20				
12	SWIR 2	2072 - 2312	20				

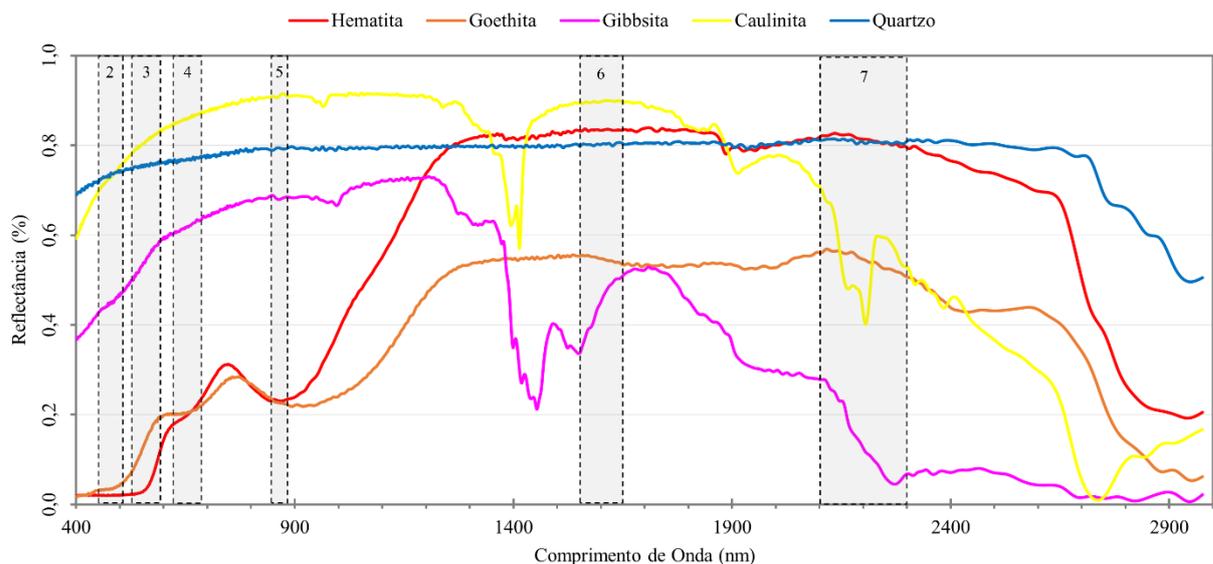


Figura 2. Comportamento espectral dos principais minerais presentes no regolito laterítico e disposição das principais bandas do Landsat-8 OLI/TIRS.

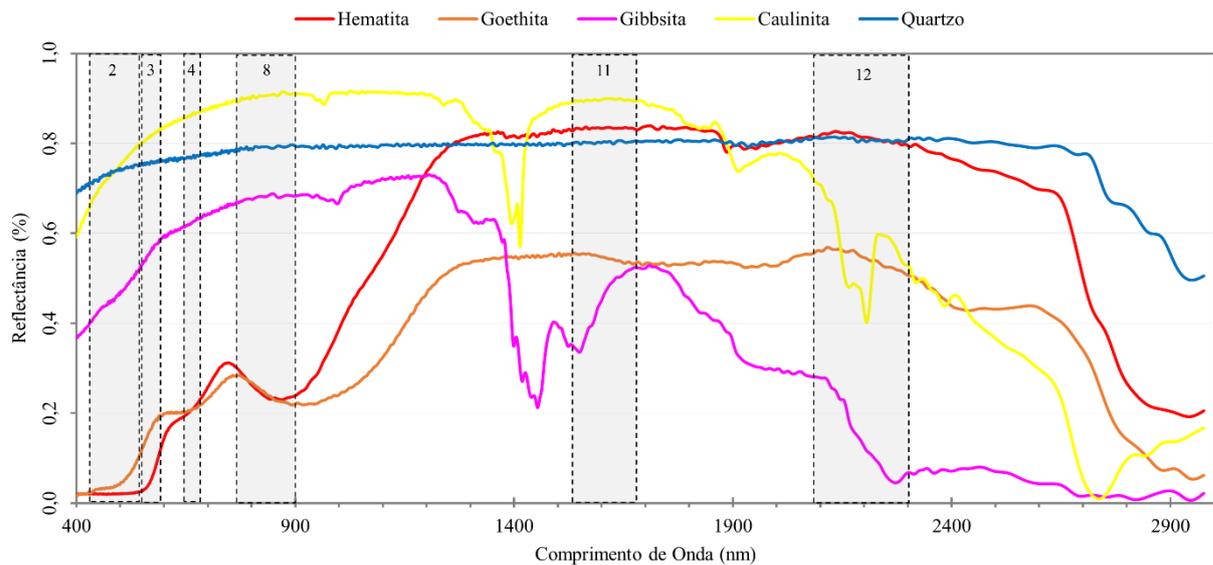


Figura 3. Comportamento espectral dos principais minerais presentes no regolito laterítico e disposição das principais bandas do Sentinel-2 MSI.

4.3. Métodos baseados em sensoriamento remoto e novas tecnologias

A partir das características químicas e mineralógicas, diferentes técnicas em sensoriamento remoto permitem discriminar os materiais do regolito laterítico, em variadas escalas espaciais, tais como composições coloridas RGB (Deller, 2006), análise de componentes principais (Soe et al., 2008; Hartwig e Caboclo, 2012; Arhin et al., 2015), modelos de mistura espectral (Kusuma et al., 2012; Cudahy et al., 2019), índices espectrais para a discriminação de óxidos de ferro, argilominerais e material rico em quartzo (Dauth, 1997; Anand e Paine, 2002; El Desoky e Shahin, 2020; Augustin, 2011; Augustin, 2016; Souza et al., 2021), e/ou classificação supervisionada (Ibrahim et al., 2018). Dos diversos modelos e técnicas, a composição colorida RGB, índices espectrais e análise de componentes principais, têm destaque devido a facilidade de uso e resultados promissores (Abrams et al., 1977; Harris et al., 2011; Shahriari et al., 2013; Ishidoshiro et al., 2016, Abrams e Yamaguchi, 2019).

A principal vantagem do uso de imagens de sensoriamento remoto para mapeamento do regolito laterítico é o custo-benefício, além da grande cobertura e disponibilidade de dados a nível global, permitindo o mapeamento de extensas áreas (Scott e Pain, 2009). Mais recentemente, o processamento de grandes volumes de dados em sensoriamento remoto tem se tornado facilitado, em especial, pelo aumento da capacidade de leitura e tratamento, desenvolvimento de *softwares* GIS (*Geographic Information System*) e disponibilidade de ferramentas em nuvem para a manipulação, além do avanço dos modelos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) para classificação, predição e integração de dados geoespaciais.

O *Google Earth Engine* (GEE — <https://earthengine.google.com/>) é uma plataforma em nuvem gratuita que abriga um grande repositório de dados geoespaciais publicamente disponíveis. Sendo um catálogo de dados pré-processados e prontos para uso, inclui uma variedade de sistemas de imagens aéreas e satelitárias, como por exemplo as coleções Landsat e Sentinel. Utiliza as linguagens *JavaScript* e *Python*, viabilizando o acesso a recursos de computação de alto desempenho para o processamento de grandes conjuntos de dados geoespaciais, com capacidade para análise de dados em escala planetária (Gorelick et al., 2017). Diferentes algoritmos estão disponíveis em funções nativas do GEE, além daquelas que podem ser desenvolvidas pelo próprio usuário. Nos tópicos abaixo, são descritas as técnicas aplicadas neste trabalho usando dados Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI, e processados no GEE.

4.3.1. Matemática de bandas

As matemáticas de bandas são cálculos aritméticos realizados pixel a pixel, considerando o valor do pixel das imagens de entrada. Visam o realce e a detecção de alvos, seja por meio da adição e multiplicação, para destaque das similaridades espectrais, ou pela subtração e divisão, para as diferenças (Strens e Wood, 1979; Rockwell e Hofstra, 2008; Pour e Hashim, 2011; Adiri et al., 2015; van der Werff e van der Meer, 2016; Pour et al., 2018). Esta técnica deve considerar o comportamento espectral do alvo de interesse, sendo útil para destacar as feições não identificadas nos dados brutos. Podem ser usadas para a detecção qualitativa de unidades litológicas, minerais de alteração e discriminação dos produtos do intemperismo, como o regolito laterítico (Wilford e Creasey, 2002; Di Tommaso e Rubinstein, 2007).

Os minerais apresentam feições espectrais singulares devido aos processos vibracionais, de transições eletrônicas, transferências de carga e processos de condução, evidenciados nas regiões do VNIR e SWIR (325 – 2500 nm) (Hunt, 1977; Hunt e Ashley, 1979; Cloutis, 1996). A escolha das bandas para as operações deve exprimir o contraste entre a absorção e reflexão do(s) mineral(is) alvo(s), ao longo do espectro eletromagnético (Rockwell e Hofstra, 2008; Augustin, 2011; Ourhizif et al., 2019). Os resultados das matemáticas de bandas podem ser melhorados com o uso de lógicas booleanas (0 ou 1), ajustes de histograma e composições RGB falsa cor (Pour e Hashim, 2014; Yousefi et al., 2018), sendo as composições RGB eficazes para a interpretação visual dos alvos geológicos (Shirazi et al., 2018).

4.3.2. Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais ou PCA (*Principal Component Analysis*) é uma técnica de análise multivariada que converte um conjunto de dados correlacionados em dados

não correlacionados, ou seja, permite que os mesmos pixels em diferentes bandas multiespectrais recebam valores distintos. Desse modo, não há redundância de informações entre as imagens resultantes (Adiri et al., 2016; Yousefi et al., 2018; Es-Sabbar et al., 2020). Em dados multiespectrais, a PCA pode realçar as características espectrais dos alvos, em especial, dos materiais geológicos (Crósta e Moore, 1989; Crósta et al., 2003; Moore et al., 2008; Pour et al., 2018; Yousefi et al., 2018). Além disso, pode dar informações sobre a distribuição espacial e abundância relativa de materiais superficiais (Loughlin, 1991).

A técnica PCA é amplamente utilizada para mapear minerais de alteração e unidades litológicas (Loughlin, 1991; Pour e Hashim, 2012; Sheikhrhimi, et al., 2019; Sekandari et al., 2020), com diversos métodos fundamentados, tais como a *Feature Oriented Principal Components Selection* (FPCS) (Loughlin, 1991), *Selective Principal Component Analysis* (Yousefi et al., 2018) e a *Directed Principal Components Analysis* (DPCA) (Fraser et al., 1997; Pour et al., 2021). Neste trabalho, foi aplicada a técnica DPCA tendo em vista os bons resultados obtidos para detecção mineral (Tiwari et al., 2011; Pour et al., 2018; Pour et al., 2019).

4.3.3. Método de Sobreposição de Índices (IOM)

Para entendimento das propriedades e o mapeamento do regolito laterítico, é normalmente adotada uma abordagem de correlação ambiental, associando dados de diferentes fontes (McBratney et al., 2000; Anand e Paine, 2002; Laffan e Lees, 2004). A ponderação de informações individuais é um dos métodos para a geração de mapas preditivos (Du et al., 2016). Nesse sentido, a integração e modelagem de dados de sensoriamento remoto multiespectral com os modelos digitais de terreno (MDT), por exemplo, são importantes para a compreensão dos processos e mapeamento dos atributos do regolito laterítico (Wilford, 2014). Diferentes métodos empíricos e estatísticos (orientados a dados), conceituais (orientados ao conhecimento) e híbridos, como os booleanos (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2009; Porwal et al., 2006), são usados no processamento de dados de sensoriamento remoto (Du et al., 2016).

O Método de Sobreposição de Índices (IOM) é uma técnica de modelagem baseada em conhecimento (“*knowledge-based*”) e consiste em atribuir um fator de ponderação empírico às camadas de mapas, considerando o nível de importância de cada uma. Nesta abordagem, os usuários classificam as informações de acordo com seu conhecimento prévio (Harris et al., 2001; Chica-Olmo et al., 2002; Sadeghi et al., 2014). O mapa resultante desta técnica mostra a disposição das áreas de interesse conforme os fatores de ponderação adotados (Bonham-Carter, 1994). Por ser uma ferramenta para ponderação e integração de informações, o IOM é útil no mapeamento do regolito laterítico em escala regional (Iza et al., 2016).

4.3.4. Abordagem estatística para validação

Os modelos baseados em sensoriamento remoto podem ser validados por dados de campo. Dentre os procedimentos para cálculo da precisão, citam-se: matriz de confusão, acurácia global, índice Kappa e índice Tau (Kruse e Perry, 2013; Pour et al., 2021). A matriz de confusão auxilia na medição do desempenho de classificações, exibindo a distribuição dos registros obtidos no modelo. A acurácia global é calculada a partir da soma dos elementos diagonais da matriz de confusão, sendo representada pela equação $PO = \sum_{i=1}^M \frac{n_{ii}}{N}$, onde M corresponde ao número de categorias, n_{ii} trata dos elementos na diagonal principal e N é o número total das amostras analisadas (Fitzgerald e Lees, 1994; Brittes, 1996). O índice Kappa (k) é uma ferramenta mais criteriosa, calculada pela expressão $k = \sum_{i=1}^M \frac{n_i + n_i}{N^2}$, onde i é o total de elementos classificados para uma categoria e $n_i + i$ representa o total de elementos amostrados. É aplicada na avaliação da precisão da classificação e utiliza todos os elementos da matriz de confusão. Tem seus valores discriminados entre péssimo ($k < 0$) e excelente (k entre 0,8 a 1,0) (Landis e Koch, 1977). O índice Tau (t) é uma medida de acurácia baseada na probabilidade *a priori*, sendo representada pela equação $\tau = \frac{PO - Pr}{1 - Pr}$, onde PO é o acordo observado e Pr é a probabilidade *a priori* de se obter o valor de concordância esperado, calculado pelo inverso do número de classes ($1/M$). Tem por objetivo analisar o nível de concordância entre os dados da matriz de confusão (Ma e Redmond, 1995).

5. ÁREA DE ESTUDO

5.1. Características gerais

A área de estudo está localizada no centro-oeste brasileiro e compreende a região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia, entre os municípios de Cristalina (GO), ao sul, e São Domingos (BA), ao norte (figura 4). Tem área próxima à 133 mil km² e os principais acessos são pelas rodovias BR-020, ao norte e BR-479, ao sul. Na maior parte da área de estudo, são observados espessos mantos de intemperismo, desenvolvidos a partir de diferentes tipos de rochas, com destaque às metassedimentares, do grupo Paranoá e Canastra. A formação do regolito laterítico na área de estudo é favorecida pelas altas temperaturas e índices pluviométricos, que variam entre 1.500 e 2.000 mm anuais (Embrapa, 1978; Goiás, 2006). Os mapas pedológicos do IBGE (2020) mostram que as principais classes de solos são latossolos e cambissolos. Os latossolos são divididos em Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, e ocorrem nos topos e nas bordas de chapadas, respectivamente. Podem constituir solos residuais desenvolvidos da alteração das crostas lateríticas mais antigas.

Os cambissolos são solos pouco desenvolvidos mineralogicamente, ocorrem nas vertentes das encostas e estão associados à afloramentos rochosos (Martins et al., 2004; IBGE, 2020).

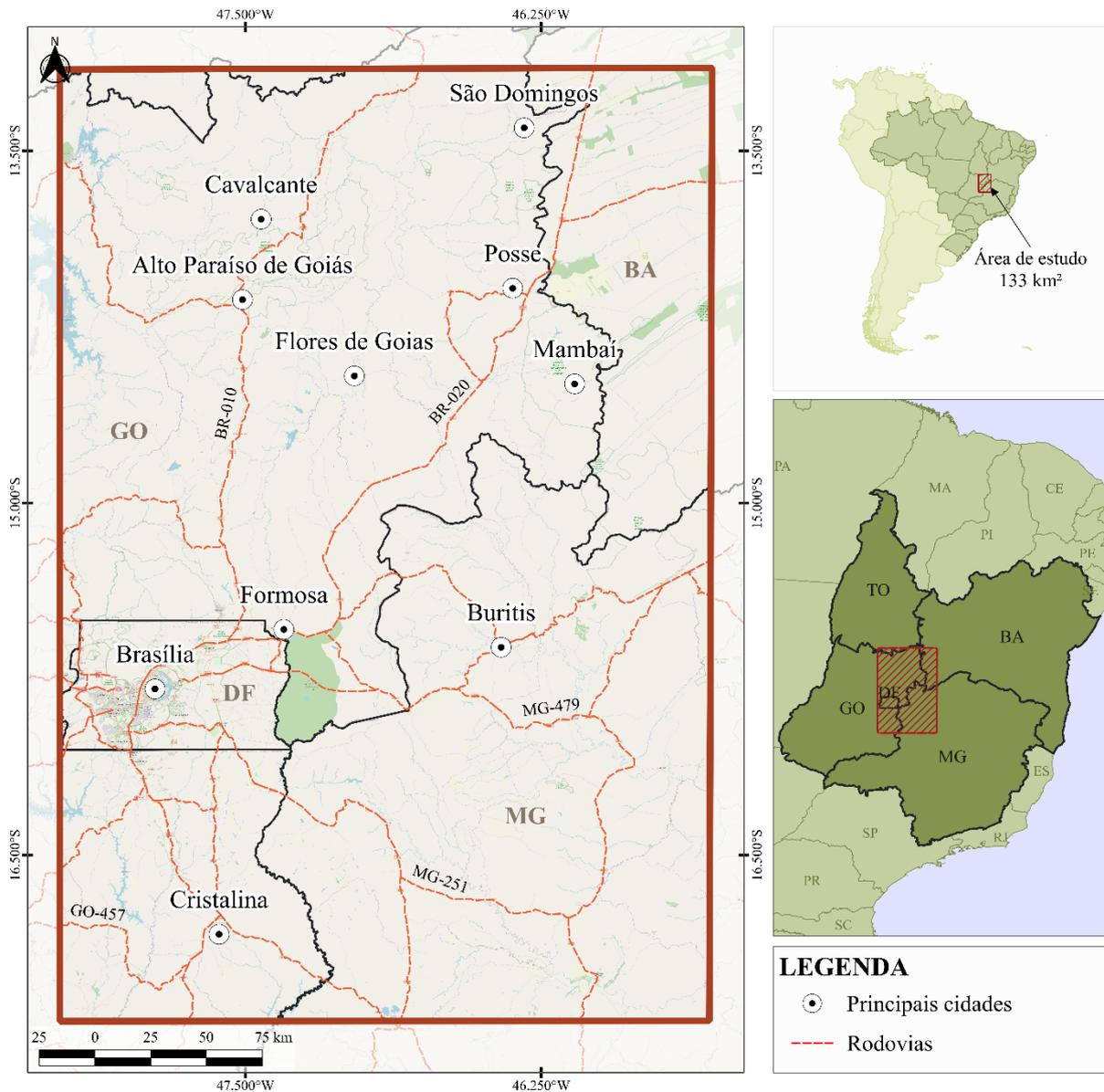


Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.

5.2. Geologia regional

A área de estudo está inserida na borda do Cráton do São Francisco em contato com a Província do Tocantins. Para este trabalho, as unidades geológicas mapeadas pelo CPRM (2000) foram simplificadas em quatro grandes grupos, com base no tipo de rocha (figura 5).

5.2.1. Complexos indiferenciados

Correspondem às rochas do Paleo-Mesoproterozóico. Esta unidade compreende as rochas mais antigas do estado de Goiás, ocupando o extremo noroeste da área de estudo.

Incluem as suítes gabro dioríticas, intrusões graníticas e diques máfico-ultramáficos (Jost et al., 1994, Moreira et al., 2008). Nesta unidade, foram agrupados os corpos e suítes do Complexo de Niquelândia, Complexo de Canabrava, granito-gnaisses sin- a tardi-tectônicos, terrenos *Greenstone Belt* e seqüências metavulcânicas sedimentares.

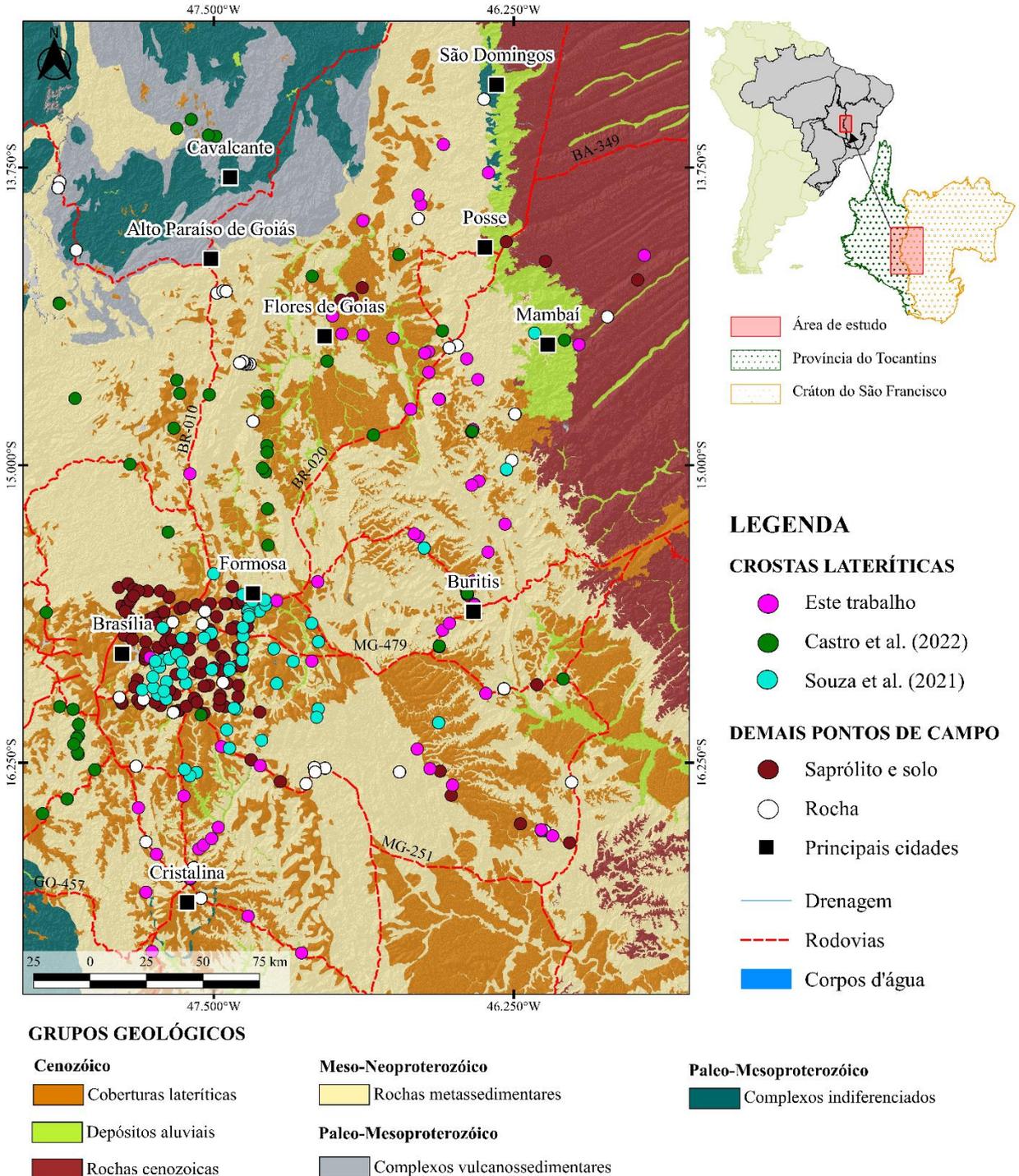


Figura 5. Mapa geológico simplificado da área de estudo (Modificado de CPRM, 2000).

5.2.2. Complexos vulcanossedimentares

Correspondem ao Grupo Araí (Paleo-Mesoproterozóico), que compõe a porção noroeste da área de estudo. É um conjunto de litotipos metassedimentares e metavulcânicos, composto por quartzitos, metarenitos, metapelitos, conglomerados e metagrauvacas, com ocorrências locais de rochas vulcânicas. Está sobreposto ao embasamento granito-gnáissico da Suíte Aurumina e da Formação Ticunzal (Dardenne et al., 1999; Dardenne, 2000; Marques, 2009).

5.2.3. Rochas metassedimentares

Correspondem aos grupos Araxá, Vazante, Canastra, Serra da Mesa, Paranoá, Ibiá, Bambuí e Santa Fé, datados do Meso-Neoproterozóico. O Grupo Araxá ocupa o extremo sudoeste da área de estudo. Compreende sequência de metassedimentos, composta por psamitos, psamo-pelitos e pelitos metamorfizados em fácies xisto verde com intercalações de anfíbolito (Lacerda Filho et al., 1999; Goiás, 2006; Navarro et al., 2013; Sabaraense, 2016).

O Grupo Vazante ocupa a porção sudoeste da área de estudo, em contato com o Cráton do São Francisco. É composto por rochas carbonáticas intercaladas com metapelitos, além de filitos, ardósias e quartzitos. Dispõe de depósitos minerais ricos em Zn, Pb e P (Rodrigues, 2008; Marques et al., 2015; Carvalho et al., 2016; Sotero et al., 2019).

O Grupo Canastra ocupa a porção sudoeste da área de estudo. Representa uma bacia de margem passiva em contato tectônico com os Grupos Araxá e Ibiá. É formado por intercalações de quartzitos e conjuntos de filitos metamorfizados em fácies xisto verde. Localmente, há fácies de mármore finos. Em direção ao topo da sequência, os filitos apresentam aumento da contribuição arenosa (Pereira et al., 1994; Valeriano et al., 2004; Rodrigues, 2008).

O Grupo Serra da Mesa compreende rochas metassedimentares e ocupa a porção noroeste da área de estudo. Corresponde a uma sucessão de quartzitos conglomeráticos, quartzitos micáceos, muscovita xistos, lentes de mármore e xistos, no topo da sequência. Tem contato discordante com as rochas da Formação Ticunzal e da Suíte Aurumina (Lacerda Filho et al., 1999; Goiás, 2006; Marques, 2009).

O Grupo Paranoá ocupa a porção oeste da área de estudo. Ocorre nas Zonas Interna e Externa da Faixa Brasília, estruturado em cinturões de dobras e falhas. É uma sequência psamo-pelito-carbonatada, composta por quartzitos, metassiltitos e metarritimitos, além de pelitos e dolomitos (Dardenne, 1978; Fuck et al., 1988; Campos et al., 2013).

O Grupo Ibiá é uma sequência metassedimentar de baixo grau metamórfico sobreposta ao Grupo Canastra, ocupando a porção sudoeste da área de estudo. É composto por quartzitos

micáceos, carbonatos e xistos, intercalados por arenitos imaturos e filitos carbonosos (Campos-Neto, 1984; Pereira, 1992; Pereira et al., 1994).

O Grupo Bambuí ocorre na porção centro-leste da área de estudo e compreende uma associação de litofácies pelito-siliciclásticas e carbonáticas. Em alguns locais, apresenta metamorfismo incipiente. É caracterizado por paraconglomerados, calcários dolomíticos, calcários, folhelhos, siltitos e margas (Dardenne, 1978; Dardenne, 2000; Goiás, 2006). É uma das unidades mais representativa da área de estudo.

O Grupo Santa Fé ocorre na porção leste da área de estudo, na região meridional da Bacia Sanfranciscana, assentado sobre o Grupo Bambuí e recoberto pelo Grupo Areado. É representado por arenitos flúvio-glaciais, siltitos e folhelhos glacio-lacustres, argilitos e diamictitos (Campos e Dardenne, 1997; Sgarbi et al., 2001; Goiás, 2006).

5.2.4. Rochas cenozoicas

Correspondem aos grupos Areado e Urucuia e às coberturas cenozoicas. O Grupo Areado (Cretáceo) ocorre na região leste da área de estudo, embasado pelo Grupo Bambuí. Tem grande variação lateral de litofácies, composto predominantemente por arenitos líticos, às vezes conglomeráticos, variando até sub-arcosianos, siltitos, folhelhos e calcários (Campos e Dardenne, 1997; Fragoso et al., 2011; Sgarbi, 2011).

O Grupo Urucuia (Neocretáceo) ocupa a porção leste da área de estudo, representa uma das unidades mais expressivas da área de estudo. É constituído por quartzarenito *red-bed*, arenitos eólicos, argilitos, pelitos e conglomerados de granulação fina a média, com grãos arredondados, bem selecionados e matriz argilosa, depositados em sistema eólico-fluvial. Está assentado sob o Grupo Bambuí (Campos e Dardenne, 1997; Goiás, 2006; Reis, 2013).

As coberturas cenozoicas incluem as coberturas lateríticas (Terciário-Quaternário) e os depósitos aluviais (Quaternário). As coberturas lateríticas ocupam a porção centro-sul da área de estudo. São caracterizadas por estruturas oolíticas, pisolíticas, granular, e/ou maciça, de textura areno-argilosa e predominância de hematita, goethita, caulinita e gibbsita, por vezes, quartzo. Podem ocorrer em perfis lateríticos completos ou truncados, às vezes níveis de linhas de pedras (Lacerda Filho, 1999; Martins, 2000, Souza et al., 2021). Os depósitos aluviais são distribuídos em planícies fluviais. São sedimentos arenosos inconsolidados e com níveis de cascalhos, oriundos de retrabalhamento fluvial de materiais diversos (Lacerda Filho, 1999).

5.3. Geomorfologia regional

A área de estudo é formada por seis domínios geomorfológicos (figura 6), com altimetria entre 380 m e 1.600 m (IBGE, 2020). Neste trabalho, os domínios foram simplificados com base nos conjuntos litomorfoestruturais e características fisionômicas semelhantes.

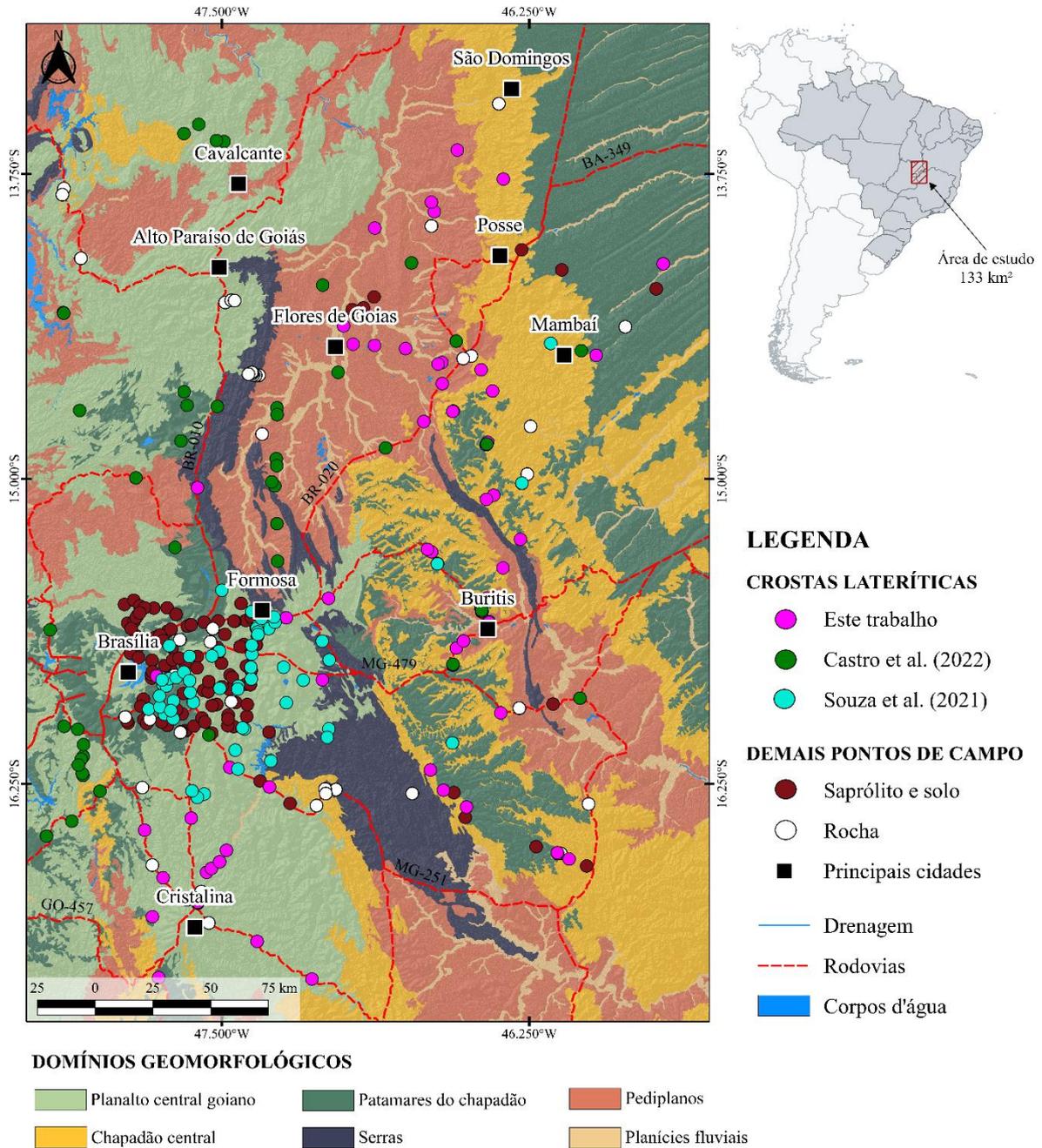


Figura 6. Mapa geomorfológico simplificado da área de estudo (Modificado de IBGE, 2020).

5.3.1. Planalto central goiano

Está localizado na porção centro-oeste da área de estudo, com cotas altimétricas entre 900 a 1.600 m. Tem grande variedade de formas de relevo, desenvolvidas a partir de rochas metamorfizadas. São superfícies regionais de aplainamento, com ocorrência de *inselbergs*. Têm

formas convexas e tabulares. Nesta região, se observa a formação de espesso manto de intemperismo (Nascimento, 1991; Latrubesse e Carvalho, 2006).

5.3.2. Chapadão central

Este domínio geomorfológico ocupa a porção centro-leste da área de estudo, com cotas altimétricas entre 400 e 800 m. Se desenvolve nas áreas de arenitos dos grupos Urucuia e Areado. Constitui superfícies com *front* de cuesta voltado para oeste, isto é, para o estado de Goiás. Tem condições planas quase perfeitas, marcada pela horizontalidade dos sedimentos. Apresenta bordas escarpadas e anfiteatros largos (Braun e Ramalho, 1979).

5.3.3. Patamares do chapadão

Se desenvolvem na porção centro-leste da área de estudo, na região dos grupos Bambuí, Urucuia e Santa Fé. Situados no sopé do Chapadão Central, tem cotas altimétricas entre 500 e 800 m. Têm grande variedade de formas de relevo e padrão de dissecação fraco. As formas mais comuns são as aplainadas por processos de pediplanação. Se desenvolvem formas cársticas como cavernas, grutas e lápias (Nascimento, 1991; Latrubesse e Carvalho, 2006).

5.3.4. Serras

Ocorrem na porção sul da área de estudo, sendo formadas pelos metassedimentos dobrados dos grupos Canastra e Paranoá. Com cotas altimétricas entre 1.200 e 1.600 m, representam superfícies pediplanadas conservadas, formadas por topos elevados e truncados (Nascimento, 1991; Latrubesse e Carvalho, 2006).

5.3.5. Pediplanos

Ocupam a faixa noroeste-sudeste da área de estudo. São superfícies planas com truncamento de diversos litotipos. Constituem superfície de aplainamento em distintos graus de dissecação e predomínio de formas tabulares e convexas. Localmente têm formas aguçadas, residuais das regiões planálticas do entorno (Nascimento, 1991; Romão et al., 2004).

5.3.6. Planícies fluviais

Correspondem às faixas de relevos planos sob processos de agradação fluvial. Desenvolvidas em toda a área de estudo, essas formas de relevo estão concentradas nos principais canais de drenagem. São domínios atuais e dinâmicos, associados à existência do nível de base local (Nascimento, 1991; Latrubesse e Carvalho, 2006).

CAPÍTULO II

Artigo científico para submissão

Imagens multiespectrais Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI para o mapeamento do regolito laterítico no centro-oeste do Brasil

Bárbara Costa da Silva¹, Adriana Maria Coimbra Horbe¹, Sancleber Freire Peixoto², Rodrigo Tokuta Castro¹

¹ Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900 Brasília - DF, Brasil.

² Agência de Mineração do Estado do Tocantins — AMETO, Esplanada das Secretarias, Praça dos Girassóis, S/Nº, 77001-000 Palmas - TO, Brasil.

RESUMO

O processamento e análise de dados de sensoriamento remoto multiespectral, como os dos sensores Landsat-8 e Sentinel-2, permitem a discriminação das unidades do regolito laterítico, facilitando o mapeamento regional dessas feições. Argilominerais, óxi-hidróxidos de ferro e quartzo, principais constituintes das crostas lateríticas, saprólito e solos, são identificados nas imagens devido às suas características espectrais singulares. Neste trabalho, as imagens Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI foram usadas com sucesso para o mapeamento do regolito laterítico na região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia, no centro-oeste do Brasil. Foram aplicadas três técnicas de processamento nos mosaicos de imagens cada sensor utilizado: matemáticas de bandas, análise de componentes principais direcionada (DPCA) e sobreposição de índices (IOM). Os mapas foram validados com base em dados de campo e tiveram acurácia global superior a 70% e valores de *kappa* e *tau* entre 0,5 e 0,6. As imagens Landsat-8 tiveram maior correspondência com os dados de campo, comparado ao Sentinel-2. Dentre as técnicas analisadas, a DPCA foi aquela com maior acurácia em ambos os sensores. Portanto, este trabalho demonstra a eficiência da abordagem multiespectral/multi-sensor no mapeamento do regolito laterítico em regiões tropicais.

Palavras-chave: Crostas lateríticas; componentes principais; matemáticas de bandas; ambiente tropical; Google Earth Engine.

1. INTRODUÇÃO

O regolito compreende todos os produtos formados por intemperismo, erosão, transporte e/ou deposição. Em regiões tropicais, se forma o regolito laterítico, ou seja,

quando é possível a observação em larga escala de crostas lateríticas, que são resultado da acumulação de óxidos e hidróxidos de Fe e Al ou SiO (Scott e Pain, 2009). Por formarem uma superfície endurecida, as crostas lateríticas sustentam o perfil regolítico. Além das crostas lateríticas, o regolito laterítico inclui solos ferruginosos, saprólitos caulíníticos e mosqueados, desenvolvidos a partir de rocha-mãe fresca ou pouco alterada (Nahon e Tardy, 1992; Butt, 2004). Tendo em vista as dinâmicas da paisagem, os perfis lateríticos estão geralmente truncados, ou seja, além das crostas lateríticas, afloram as demais unidades: saprólito, mosqueado e rocha-mãe fresca ou pouco alterada.

As características físicas, químicas e mineralógicas do regolito laterítico diferem daquelas das rochas parentais (Anand e Paine, 2002). A distribuição mineral nestes perfis é bastante singular (Costa, 2007). Em regra, são compostos por várias misturas de caulinita, hematita e/ou goethita e/ou gibbsita nas camadas superiores. Os minerais menos estáveis estão em profundidade, próximos ao leito rochoso (Butt, 2004). Todos esses minerais têm comportamento espectral distinto, permitindo a discriminação por meio de feições diagnósticas (Sabins, 1999; Augustin, 2011; Mazhari et al., 2017). As principais feições espectrais do Fe³⁺ e Fe²⁺, presentes na hematita, goethita e jarosita, estão na faixa do visível ao infravermelho próximo, de 450 a 900 nm e 950 a 1200 nm. Já as principais feições dos minerais hidratados, como caulinita e montmorillonita, além de silicatos, carbonatos e sulfatos, estão na faixa do NIR (*near infrared*) e SWIR (*shortwave infrared*), em torno de 1300–1450 nm, 1179–2060 nm e 2105–2240 nm (Sherman et al., 1982; Clark e Rencz, 1999; Loughlin, 1991; Augustin, 2011; Rockwell, 2012; Mazhari et al., 2017).

As feições espectrais dos minerais permitem mapear o regolito laterítico por sensoriamento remoto (Henderson III et al., 1984; Tapley e Gozzard, 1992; Wilford e Creasey, 2002; Augustin, 2011; Farooq e Govil, 2014; Arhin et al., 2015; Ibrahim et al., 2018; Girija e Mayappan, 2019; Tripathi e Govil, 2020; Caruso et al., 2021; Souza et al., 2021), com maior consistência e ganhos no custo-benefício e tempo de processamento (Wilford, 1992; Langford, 2015; Caruso et al., 2018, Girija e Mayappan, 2019). Dados Landsat têm seu uso consolidado para a identificação mineral e mapeamento do regolito laterítico (Dauth, 1997; Craig et al., 1999; Deller, 2006; De Boissieu et al., 2018; Caruso et al., 2021; Souza et al., 2021). Dados Sentinel-2 têm poucos estudos para o mapeamento das crostas lateríticas (Ibrahim et al., 2018), apesar do uso para identificação mineral (van der Meer et al., 2012; van der Meer et al., 2014; Hu et al., 2018; Forson et al., 2021).

No Brasil, o regolito laterítico ocupa cerca de 65% da paisagem, distribuído em diversas regiões bioclimáticas (Costa, 1997; Espíndola e Daniel, 2008; Iza et al., 2018). Carrino et al. (2011) apontam que os estudos do regolito laterítico no Brasil se concentram em aspectos geoquímicos, mineralógicos e de exploração mineral. Isso ressalta o pouco uso dos dados de sensoriamento remoto para o mapeamento destas feições, especialmente com dados multiespectrais, embora já tenham sido usados em outras regiões do mundo (Tapley e Gozzard, 1992; Wilford e Creasey, 2002). Além disso, na região centro-oeste do Brasil, há poucos mapeamentos do regolito laterítico (CPRM, 2000; Souza et al., 2021; Peixoto et al., 2021). Se ressalta que o mapeamento destes perfis é essencial para a exploração mineral, entendimento dos processos supergênicos e de evolução da paisagem, além de avaliar estágios de intemperismo e relações regolito-forma do relevo (Anand e Paine, 2002; Cohen et al., 2010; Arhin et al., 2015; Metelka et al., 2017).

No sensoriamento remoto multiespectral, além da interpretação visual (Deller, 2006), diversas técnicas de realce são aplicadas às imagens para o reconhecimento do regolito laterítico e seus constituintes, tais como a análise de componentes principais (Craig et al., 1999; Mahanta e Maiti, 2018), índices espectrais e álgebras de mapas (Soe et al., 2008; Arhin et al., 2015; Augustin, 2017; Ntori et al., 2019; Souza et al., 2021). Além destas técnicas, o mapeamento do regolito laterítico deve integrar várias fontes de dados (Anand e Paine, 2002). Dentre os métodos para a integração, a ponderação de informações e a sobreposição de índices, ganham destaque pela facilidade de aplicação (Saadat et al., 2008; Mulder et al., 2011; Du et al., 2016; Caruso et al., 2018).

Para contribuir no estudo desse tema, imagens multiespectrais Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI foram processadas e realçadas a partir de diferentes técnicas e modelos matemáticos e estatísticos. O principal objetivo foi identificar qual destes dados multiespectrais e técnicas aplicadas melhor identificam o regolito laterítico na região limítrofe dos estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Bahia, centro-oeste do Brasil. Para maior abrangência regional, foram adicionados a este trabalho os dados de campo e geoquímicos de Souza et al. (2021), localizados no sudoeste da área.

2. FONTE DE DADOS E PROCESSAMENTO

2.1. Dados multiespectrais

Foram utilizados dados multiespectrais Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI para extrair e mapear as unidades do regolito laterítico: i) crostas lateríticas, ii) saprólito,

mosqueado e solos, e iii) rochas, que inclui metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados. Vinte e oito imagens do satélite Landsat-8 OLI/TIRS e 76 imagens do Sentinel-2 MSI, disponibilizadas gratuitamente e com 30 m e 10 m de resolução, respectivamente, foram selecionadas e processadas na plataforma em nuvem *Google Earth Engine* (GEE) (<https://earthengine.google.com/>). O GEE disponibiliza um catálogo de dados geoespaciais pré-processados e prontos para uso (Gorelick et al., 2017).

Para reduzir o conjunto de dados, foram aplicados parâmetros de filtragem que consideram somente imagens sem cobertura de nuvens, mais alta qualidade radiométrica e data de aquisição entre maio e agosto de 2020, período de estiagem na área de estudo. As imagens estão ortorretificadas e os efeitos atmosféricos corrigidos pelo modelo LaSRC (*Land Surface Reflectance Code*) para as imagens Landsat-8, e pelo *Sen2Cor*, para o Sentinel-2. Por haver diferentes resoluções espaciais entre as bandas do Sentinel-2 MSI, todas foram reamostradas para 20 m. Com o conjunto de imagens resultante, foram construídos mosaicos através do cálculo de mediana dos pixels, sendo um mosaico para cada sensor. Fornecidos pelo JPL/NASA, dados altimétricos SRTM com resolução de 30 m foram utilizados para integração dos dados e geração dos mapas do regolito laterítico.

2.2. Métodos para o mapeamento do regolito laterítico

Após o processamento básico, foram aplicadas e testadas diferentes técnicas de realce às imagens multiespectrais Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI, para identificar o sensor e a técnica analítica que melhor se aplica ao mapeamento do regolito laterítico na área de estudo. Foram utilizadas as técnicas: i) matemáticas de bandas, ii) análise de componentes principais direcionada (DPCA) e iii) sobreposição de índices (IOM). A figura 7 mostra o fluxograma de processamento dos dados adotado neste trabalho.

As matemáticas de bandas são usadas para identificar as transferências de carga do Fe^{3+} e Fe^{2+} e vibrações do Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH e Si-OH, que estão relacionadas a ocorrência das crostas lateríticas, saprólito, mosqueado, solo e rochas, respectivamente. É uma operação aritmética baseada nas feições espectrais diagnósticas dos materiais alvos e utiliza os valores dos pixels das imagens (Abrams et al., 1977; Abrams et al., 1983; Crósta e Moore, 1989; Carranza e Hale, 2002; Rockwell e Hofstra, 2008; Mwaniki et al., 2015; Ducart et al., 2016; Ourhzif et al., 2019; Giriya e Mayappan, 2019; Adiri et al., 2020; Wambo et al., 2020; Osinowo et al., 2021; Pour et al., 2021). As matemáticas de bandas são úteis ao mapeamento do regolito laterítico (Deller, 2006; Souza et al., 2021).

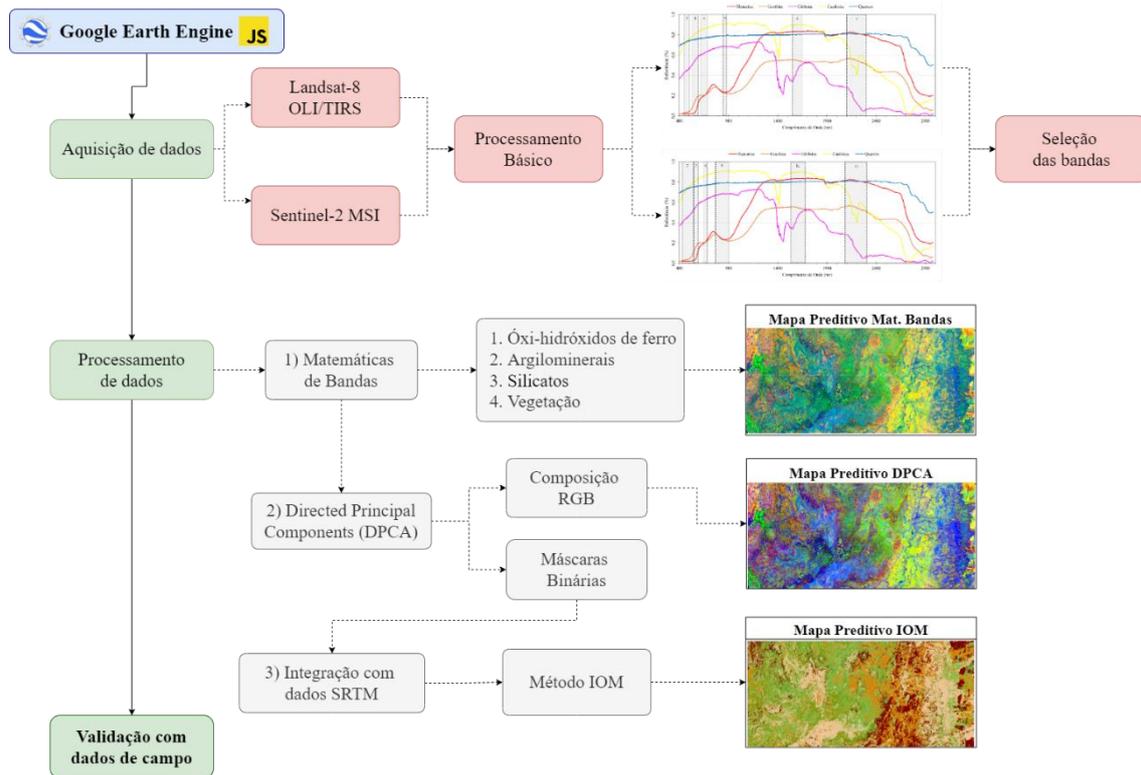


Figura 7. Fluxograma do processamento aplicado às imagens Landsat-8 OLI/TIRS e Sentinel-2 MSI na plataforma de nuvem Google Earth Engine (GEE).

Para as imagens Landsat-8 OLI/TIRS, foram adotadas as operações: i) 4/2 para crostas lateríticas, ii) 4/7 para rochas, iii) (6/7)/(5/4) para saprólito, mosqueado e solo e iv) (5-4)/(5+4) para vegetação (Rousse et al., 1973; Ducart et al., 2016; Menezes et al., 2019; Osinowo et al., 2020; Wambo et al., 2020; Pour et al., 2021). Para as imagens Sentinel-2 MSI, as mesmas características espectrais são identificadas nas matemáticas de bandas: i) 4/2 (crostas lateríticas), ii) 4/12 (rochas), iii) (11/12)/(8/4) (saprólito, mosqueado e solo) e iv) (8-4)/(8+4) (vegetação). As razões 5/4 e 8/4 reduzem os efeitos da vegetação nos argilominerais (Ducart et al., 2016), apesar disso, as feições espectrais da vegetação na faixa do VNIR interferem na identificação do Fe^{3+} e Fe^{2+} (Fraser, 1991). Aos resultados, foi aplicado ajuste gaussiano dos histogramas, aumentando o contraste das imagens e melhorando a identificação dos alvos. Os mapas preditivos do regolito laterítico com as matemáticas de bandas foram gerados a partir de composições coloridas RGB falsa cor, sendo elas R: (4/2), G: (6/7)/(5/4) e B: (4/7), para Landsat-8 e R: (4/2), G: (11/12)/(8/4) e B: (4/12), para as imagens Sentinel-2.

Enquanto as matemáticas de bandas detectam as características espectrais do Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH e Si-OH, relacionados aos minerais do regolito laterítico, a análise de componentes principais (PCA) mapeia as unidades do regolito laterítico

(Wilford e Creasey, 2002; Arhin et al., 2015; Tripathi e Govil, 2020). A PCA é uma técnica para redução de covariância das imagens de entrada, ou seja, remove a redundância de informações dos mesmos pixels em diferentes bandas (Gomez et al., 2005). Diversos métodos são baseados na PCA, como a análise de componentes principais direcionada (DCPA) (Fraser e Green, 1987) e a *Feature Oriented Principal Components Selection* (FPCS) (Loughlin, 1991), por exemplo.

Apoiada na extração direta de informações, a DPCA é aplicada no resultado das matemáticas de bandas (Fraser e Green, 1987; Pour et al., 2021). Com a redução do número de dados de entrada, a técnica resulta em maior chance de definição do componente principal exclusivo (PC). Esta técnica separa as informações de Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH e Si-OH, dos demais componentes superficiais (Fraser, 1991; Wilford e Creasey, 2002, Tangestani et al., 2008; Honarmand et al., 2013), sendo mais adequada ao mapeamento do regolito laterítico por diferenciar esses perfis em relação à vegetação e demais constituintes das paisagens (Dickson et al., 1996; Carranza e Hale, 2002; Wilford e Creasey, 2002; Tiwari et al., 2011; Pour e Hashim, 2015, Metelka et al., 2018; Mahanta e Maiti, 2018; Pour et al., 2019; Noori et al., 2019; Moradpour et al., 2020; Pour et al., 2021; Shebl et al., 2021). A DPCA detecta o grau de homogeneidade do pixel, ou seja, é também um método de desmistura (Honarmand et al., 2013).

Neste trabalho, os dados de entrada para a DPCA foram as matemáticas de bandas: i) 4/2, ii) 4/7, iii) (6/7)/(5/4) e iv) (5-4)/(5+4) das imagens Landsat-8 e i) 4/2, ii) 4/12, iii) (11/12)/(8/4) e iv) (8-4)/(8+4) das imagens Sentinel-2, visando a identificação das áreas de 1) crostas lateríticas e seus produtos, 2) saprólito, mosqueado e solo e 3) rochas, além das áreas de vegetação densa. A função *.eigen()* no GEE gerou uma matriz de autovetores que representa a contribuição de cada matemática de banda na composição da imagem DPCA. Os autovetores indicam em qual dos principais componentes (PC) estão concentradas as informações sobre as crostas lateríticas, saprólito e rochas, que já tiveram seus minerais constituintes previamente identificados pelas matemáticas de bandas.

A magnitude e o sinal (+/-) dos autovetores determinam se o alvo de interesse é representado como pixels claros (+) ou escuros (-) (Fraser, 1991; Pour et al., 2021). As imagens onde o alvo de interesse é indicado em pixels escuros (-) foram multiplicadas por -1. As áreas de ocorrência das unidades do regolito laterítico foram individualizadas por máscaras binárias booleanas (0 ou 1), com valores de corte definidos arbitrariamente

a partir dos valores médios dos pixels (tabela 2). Os mapas preditivos do regolito laterítico com DPCA foram gerados por composições coloridas RGB falsa cor.

Tabela 2. Valores de média (\bar{X}) e desvio padrão (σ) dos histogramas das imagens derivadas da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em dados Landsat-8 e Sentinel-2.

Regolito Laterítico e Vegetação	Landsat-8 OLI/TIRS		Sentinel-2A MSI		Limite de Corte
	Média (\bar{X})	σ	Média (\bar{X})	σ	
Crostras lateríticas	2,18	0,76	1,68	0,35	$\bar{X} + \sigma$
Saprólito, mosqueado e solo	0,61	3,03	0,65	0,63	$\bar{X} + \sigma$
Rochas	0,56	0,16	0,09	0,22	$\bar{X} + \sigma$
Vegetação	0,47	2,55	1,13	0,11	$\bar{X} + \sigma$

Tendo em vista a importância de dados altimétricos para o mapeamento geológico e com o intuito de refinar os resultados da DPCA, foi utilizado o método de sobreposição índices (IOM) para integrar as imagens DPCA e dados SRTM 30 m. O método IOM é técnica de ponderação que permite analisar e integrar diferentes dados pela lógica booleana (Bonham-Carter 1994; Carranza e Hale, 2001; Yousefi e Carranza, 2016; Forson et al., 2021). Para a ponderação, foram utilizadas as máscaras binárias booleanas (0 ou 1) das imagens DPCA para cada área de ocorrência das unidades do regolito laterítico e vegetação densa, juntamente com máscaras binárias de dados altimétricos do SRTM. Para a área de estudo, se observou em campo que as crostras lateríticas ocorrem entre 380 m e 680 m e entre 1000 m e 1200 m de altitude. Valores dentro destes intervalos foram assinalados como 1 e fora dos intervalos, assinalados como 0.

Para integração destes dados e geração do mapa preditivo, foi adotada a ponderação expressa na equação (1) $\Sigma = 1 \times \text{vegetação} + 10 \times \text{rochas} + 100 \times \text{saprólito, mosqueado e solo} + 1000 \times \text{crostras lateríticas}$ (tabelas 7 e 8). Os pesos foram definidos arbitrariamente com o objetivo de maximizar as diferenças entre as classes, sendo o peso 1 atribuído à classe de vegetação, que apresenta maior abundância, peso 10 para rochas, peso 100 para saprólito, mosqueado e solo, e peso 1000 para as crostras lateríticas.

2.3. Validação dos resultados

Testes estatísticos de acurácia global, índice kappa e índice tau foram adotados para a validação dos métodos utilizados (Klecka, 1980; Cohen, 1988; Landis e Koch, 1977). Para maior abrangência regional, foram integrados a este trabalho os dados de campo do mapa do regolito, gerado a sudoeste da área de estudo (Souza et al., 2021) e do estudo da geomorfologia local (Castro et al., 2022). Dos 217 pontos de crostras lateríticas

para validação, 71 pontos de campo são deste trabalho, 98 pontos cedidos por Souza et al. (2021) e 48 pontos por Castro et al. (2022). Dos 114 pontos de saprólito e solos, 14 são deste trabalho e 100 de Souza et al. (2021). Dos 45 pontos de campo de rochas, 22 são deste trabalho, 8 de Souza et al. (2021) e 15 de Castro et al. (2022). Todos esses 376 pontos foram utilizados para validação estatística dos mapas do regolito laterítico.

A acurácia global é calculada por $PO = \sum_{i=1}^M \frac{ni}{N}$, onde M é o número de categorias inseridas na matriz de confusão; *ni* são os elementos da diagonal principal e N é o número total de amostras (Story e Congalton, 1986). É medida em porcentagem, quando próximo a 100% indica alta precisão do modelo. O índice kappa (κ) é mais rigoroso e criterioso que a acurácia global e fornece a medida do grau de concordância (Fitzgerald e Lees, 1994; Du et al., 2012). É calculado a partir de $k = \sum_{i=1}^M \frac{ni+n+i}{N^2} \cdot ni$, onde *i* é o total de elementos classificados para uma categoria e *ni + i* representa o total de elementos amostrados. O índice kappa valida o mapa em $\kappa < 0$ (ruim), entre 0 e 0,20 (fraca), entre 0,21 e 0,40 (razoável), 0,41 e 0,60 (moderado), 0,61 e 0,80 (forte) e entre 0,81 e 1,0 (excelente) (Landis e Koch, 1977). No índice tau (τ), as probabilidades *a priori* de pertencimento a uma categoria são iguais em uma classificação (Ma e Redmond, 1995; Næsset, 1996). É calculado pela equação $\tau = \frac{PO-Pr}{1-Pr}$, onde PO é o acordo observado e Pr é a probabilidade *a priori* de se obter o valor de concordância esperado, calculado pelo inverso do número de classes (1/M). O kappa e o tau são calculados com os valores marginais da matriz de confusão (Klecka, 1980; Ma e Redmond, 1995; Brites et al., 1996).

2.4. Análises das amostras de campo

Dos pontos de campo, foram selecionados oito pontos como representativos da composição mineral, química e de reflectância das crostas lateríticas e do solo da área de estudo (tabela 3). Aos dados obtidos, foram acrescentados os dados geoquímicos de Souza et al. (2021). Os minerais das amostras foram identificados por difração de raios-X (DRX) (RIGAKU IV equipado com tubo de Cu) com varredura entre 0° e 60°, na Universidade de Brasília-UnB. As composições químicas de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅ foram obtidas após a fusão com LiBO₂ e digestão com água régia, determinados por ICP-AES e perda de ignição (LOI) por aquecimento a 1000 °C (tabela 2). Todas essas análises químicas foram realizadas na *ALS Laboratory Services*.

A reflectância das oito amostras foi extraída no espectrorradiômetro *ASD FieldSpec 4 Standard Resolution*, com varredura de 350 nm a 2500 nm (VIS — SWIR) calibrado com placa de *spectralon*. Foram feitas seis leituras em cada amostra e gerada a reflectância espectral média. Os espectros de reflectância foram transformados para remoção do contínuo espectral e em espectros de absorbância, para melhor visualização das feições de absorção (Clark e Roush, 1984). Os comprimentos de onda de 350–449 nm e 2451–2500 nm foram eliminados, dada a baixa relação sinal-ruído (Davari et al., 2021). Os gráficos de comportamento espectral foram gerados no *Orange DataMine 3.32*.

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Quatorze grupos são identificados na área de estudo pelos mapas de geodiversidade 1:1.000.000 do CPRM (2000). Neste trabalho, os grupos geológicos foram simplificados em quatro unidades com base no tipo de rocha (figura 8). A partir destas rochas, se desenvolveu extenso regolito laterítico e sedimentos inconsolidados.

A unidade 1 - “Complexos indiferenciados” inclui suítes gabro dioríticas, intrusões graníticas e diques máfico-ultamáficos paleo-mesoproterozóicos, no norte da área de estudo. A unidade 2 - “Complexos vulcanossedimentares” é composta por rochas metassedimentares e metavulcânicas, com destaque aos quartzitos, metarenitos e metagrauvas paleo-mesoproterozóicos do Grupo Araí, no norte da área de estudo. A unidade 3 - “Rochas metassedimentares” compreende conjunto de rochas meso-neoproterozóicas com distintos graus de metamorfismo. Inclui psamitos e psamo-pelitos (Grupo Araxá), carbonatos e metapelitos (Grupo Vazante), quartzitos e ardósias (Grupo Canastra), quartzitos (Grupo Serra da Mesa), metaconglomerados e metarritimitos (Grupo Ibiá), carbonatos intercalados com pelitos e quartzitos (Grupo Paranoá), no sudoeste da área. Arcóseos e carbonatos (Grupo Bambuí) na porção central da área e diamictitos e arenitos (Grupo Santa Fé), no leste da área. A unidade 4 - “Coberturas cenozoicas” inclui conglomerados e arenitos (grupos Areado e Urucua) na porção leste da área de estudo (Dardenne et al., 1998; Lacerda Filho, 1999; Campos e Dardenne, 1997; Martins et al., 2004; Latrubesse e Carvalho, 2006; Rodrigues, 2008; Iglesias e Uhlein, 2009; Campos et al., 2013; Moraes, 2014; Tanizaki et al., 2015; Souza et al. 2021).

Seis domínios geomorfológicos, com altimetria entre 380 e 1600 m, são reconhecidos na área de estudo (figura 8), agrupados por características fisionômicas semelhantes: i) Planalto central goiano entre 900 e 1600 m de altitude com ocorrência de

inselbergs; ii) Chapadão central entre 400 e 800 m de altitude com formas aplainadas e *front* de cuestras; iii) Serras entre 700 e 1000 m de altitude com escarpamento de serras, morros e colinas com *hogbacks*; iv) Planícies fluviais entre 300 e 450 m de altitude com formas agradacionais; v) Patamares do chapadão entre 800 e 1000 m de altitude com formas aplainadas, colinas alongadas, e desenvolvimento de relevos cársticos e vi) Pediplanos entre 380 e 600 m, de caráter intermontano e extensa superfície caracterizada por residuais de aplainamento (Nascimento, 1991; Latrubesse e Carvalho, 2006).

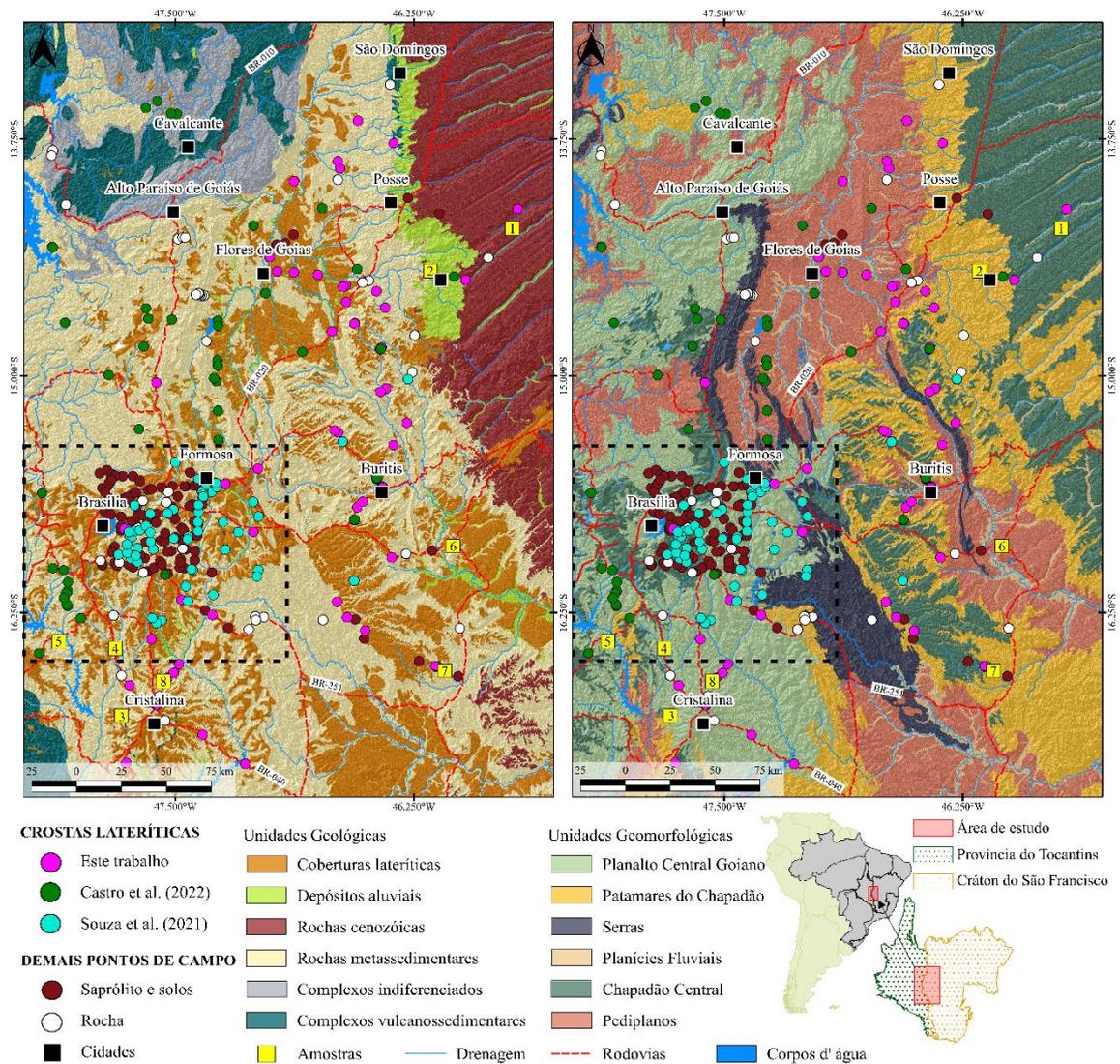


Figura 8. Mapa geológico simplificado da área de estudo. O quadrado tracejado destaca a área de estudo de Souza et al. (2021). Fonte: CPRM, 2000 e IBGE, 2020.

3.1. Descrição do regolito laterítico

O perfil laterítico completo típico da área de estudo é descrito na figura 9. As crostas lateríticas e seus produtos de dismantelamento (concreções ferruginosas, nódulos e pisólitos) ocorrem, majoritariamente, em dois níveis altimétricos, nos planaltos

ondulados e pediplanos (domínios geomorfológicos i e vi), com 1000 m a 1200 m e 380 m a 680 m de altitude, respectivamente. Formam lajes com até 3 m de espessura, blocos métricos e concreções soltas, geralmente sobrepostas por latossolos (figura 10). São desenvolvidas a partir de todos os tipos de rochas da área de estudo. Raramente formam linhas de pedra. Apresentam estrutura maciça e textura vermiforme e pisolíticas, às vezes oolíticas, com marcas de raízes e formadas, majoritariamente, por hematita e goethita.

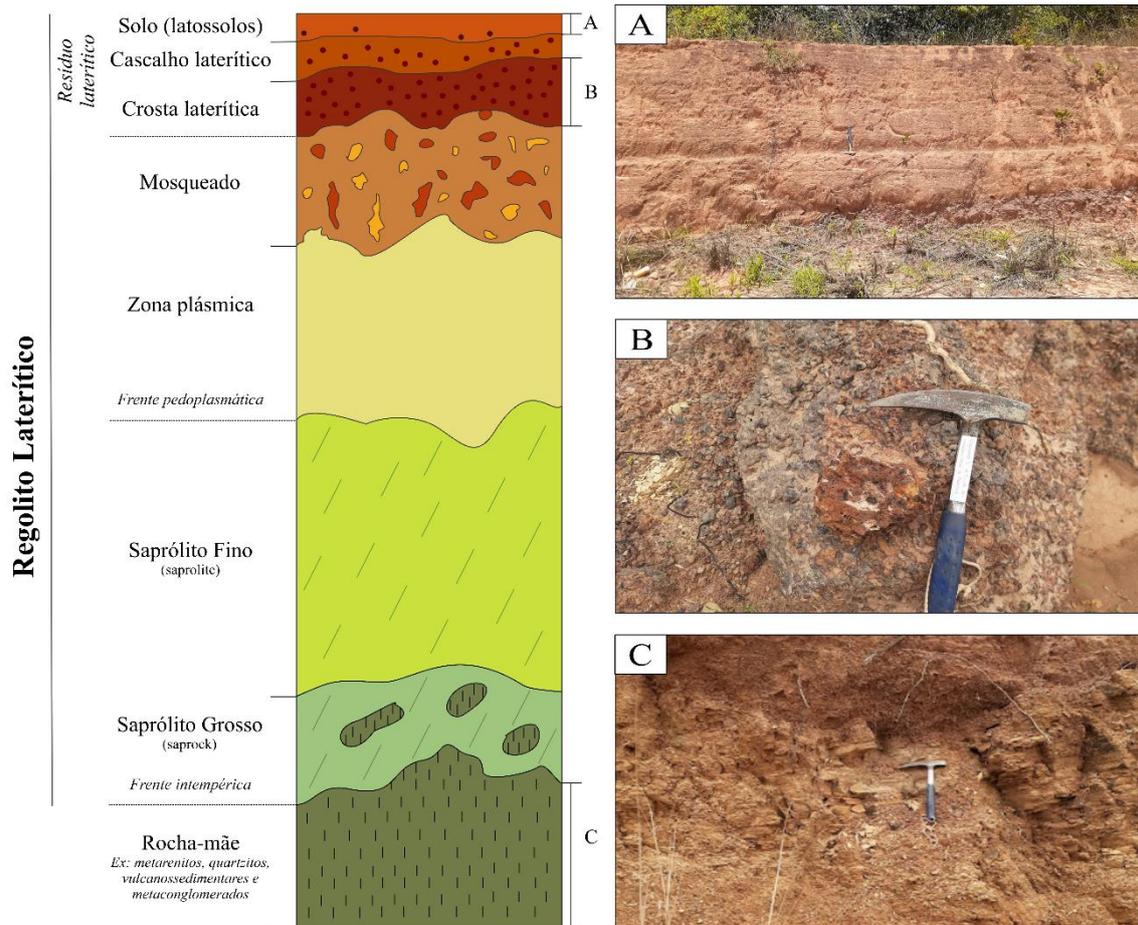


Figura 9. Perfil laterítico completo típico da área de estudo, com destaque aos horizontes. A) Foto de campo, perfil de latossolo com aproximadamente 2 m. B) Crosta laterítica (textura oolítica). C) Folhelho aflorante na área de estudo, compondo o horizonte de rocha do regolito laterítico na área de estudo.

Os difratogramas de DRX indicam que caulinita, hematita, goethita e quartzo são os principais minerais das crostas lateríticas na área de estudo (figura 11). Gibbsita ocorre apenas nas amostras 1, 3 e 7. A mineralogia das crostas lateríticas condiciona os elevados teores de Fe_2O_3 (40,80% - 54,50%) e os medianos de SiO_2 e Al_2O_3 (18,95% - 38,10% e 3,53% - 18,80%) (tabela 3). Os demais elementos nas crostas lateríticas têm teores menores que 0,26% (tabela 3). Essa composição química, similar à de Souza et al. (2021)

e Martins (2000), indica moderada a forte lateritização na região de estudo. As crostas da área de estudo são, majoritariamente, do tipo laterítica e ferruginosa (figura 12).

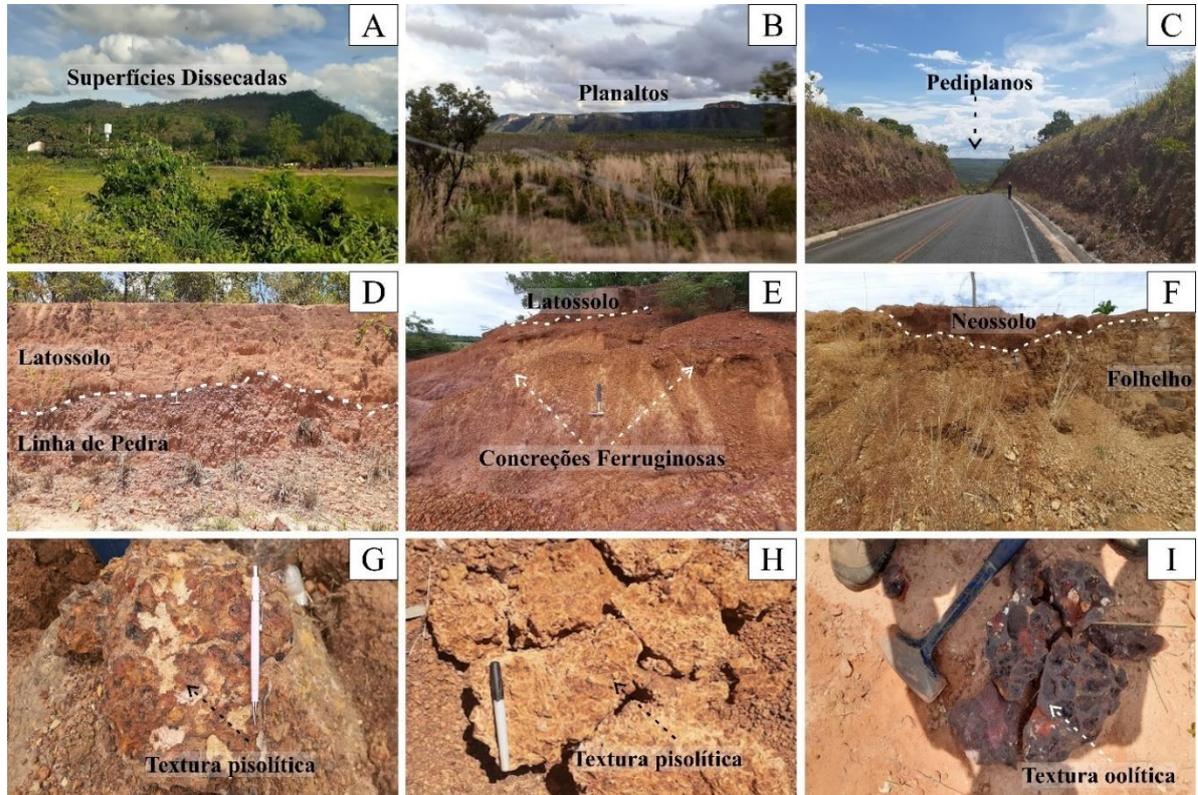


Figura 10. A, B e C: feições das paisagens dos domínios geomorfológicos ii, v e vi; D: vista do perfil de latossolo e linha de pedra; E: vista das concreções ferruginosas soltas sobrepostas por latossolo no topo; F: perfil de neossolo e rocha; G, H e I: textura das crostas lateríticas.

Tabela 3. Composição química dos elementos majoritários e LOI em crostas lateríticas e solo, expressos em %. Valores de CaO e MnO > 0,01. Os valores médios, máximos e mínimos servem para comparação com aqueles identificados por Souza et al. (2021).

Amostra	Textura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total	
1	Solo	--	77,20	11,60	3,31	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,85	0,02	6,85	99,87
2	Crosta laterítica	Massiva	38,10	3,53	46,60	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,14	0,03	6,49	94,92
3	Crosta laterítica	Pisolítica	20,30	17,75	43,40	0,01	<0,01	0,08	0,03	1,20	0,15	14,70	97,70
4	Crosta laterítica	Pisolítica	18,95	13,40	54,50	0,03	0,02	0,13	0,01	0,64	0,08	12,60	100,37
5	Crosta laterítica	Pisolítica	24,80	11,20	49,70	0,01	<0,01	0,03	0,02	0,73	0,06	12,40	98,96
6	Crosta laterítica	Pisolítica	29,60	14,70	40,80	0,14	0,01	0,40	0,04	0,73	0,13	12,55	99,13
7	Crosta laterítica	Pisolítica	34,70	7,18	43,40	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,40	0,03	10,10	95,95
8	Crosta laterítica	Pisolítica	25,40	18,80	42,50	0,04	0,02	0,26	0,03	0,96	0,08	13,25	101,37
Este trabalho	Média		33,63	12,27	40,53	0,05	0,02	0,12	0,02	0,71	0,07	11,12	--
	Máximo		77,20	18,80	54,50	0,14	0,02	0,40	0,04	1,20	0,15	14,70	--
	Mínimo		18,95	3,53	3,31	0,01	0,01	0,01	0,01	0,14	0,02	6,49	--
Souza et al. (2021)	Média		22,93	18,50	44,17	0,06	0,02	0,30	--	0,97	0,08	12,09	--
	Máximo		28,90	23,40	54,50	0,12	0,05	0,61	--	1,53	0,11	13,60	--
	Mínimo		16,30	13,90	33,40	0,01	0,01	0,09	--	0,54	0,03	9,82	--

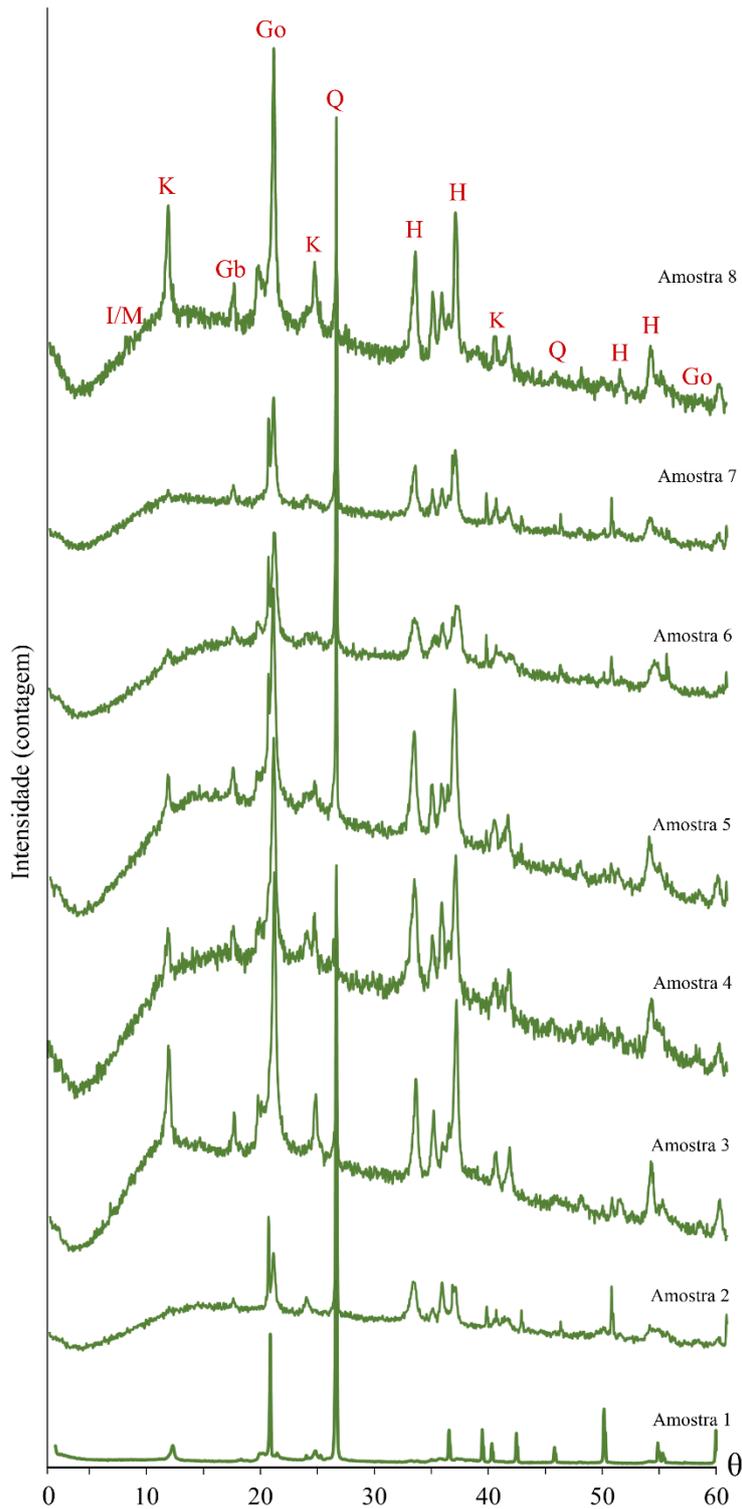


Figura 11. Difratomogramas de raios-X (DRX) das crostas lateríticas e de solo da área de estudo. Minerais mais comuns nas crostas lateríticas e solo identificados por I/M-ilita e/ou muscovita, K-caulinita, Gb-gibbsita, Go-goethita, Q-quartzo e H-hematita.

Os latossolos têm até 5 m de espessura e textura média a argilosa, constituídos principalmente por caulinita, gibbsita, hematita e goethita. Além disso, análise por DRX

indica anatásio (figura 11). Os dados geoquímicos mostram alto teor de SiO_2 (77,20%) e baixos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (11,60% e 3,31%) (tabela 3), quando comparado às crostas lateríticas. Ocorrem, sobretudo, nos domínios geomorfológicos i e ii, com altimetria entre 1000 m e 1200 m. Nos desenvolvidos a partir de metarritimitos arenosos, há predomínio de quartzo, seguido por caulinita, hematita e goethita. Os latossolos desenvolvidos no grupo Urucuia, a nordeste da área de estudo, têm predominância de quartzo e menor concentração de hematita. Cambissolos ocorrem no domínio geomorfológico iii (Serras).

O saprólito e mosqueado são constituídos, basicamente, por caulinita seguido de ilita, manchados por zonas com hematita e goethita. O horizonte mosqueado tem até 3 m de espessura, com cores amareladas a avermelhadas, ocorre no domínio geomorfológico vi (Pediplanos). Afloramentos de rocha ocorrem no domínio geomorfológico i (Planalto central goiano) e em feições cársticas do domínio geomorfológico vi.

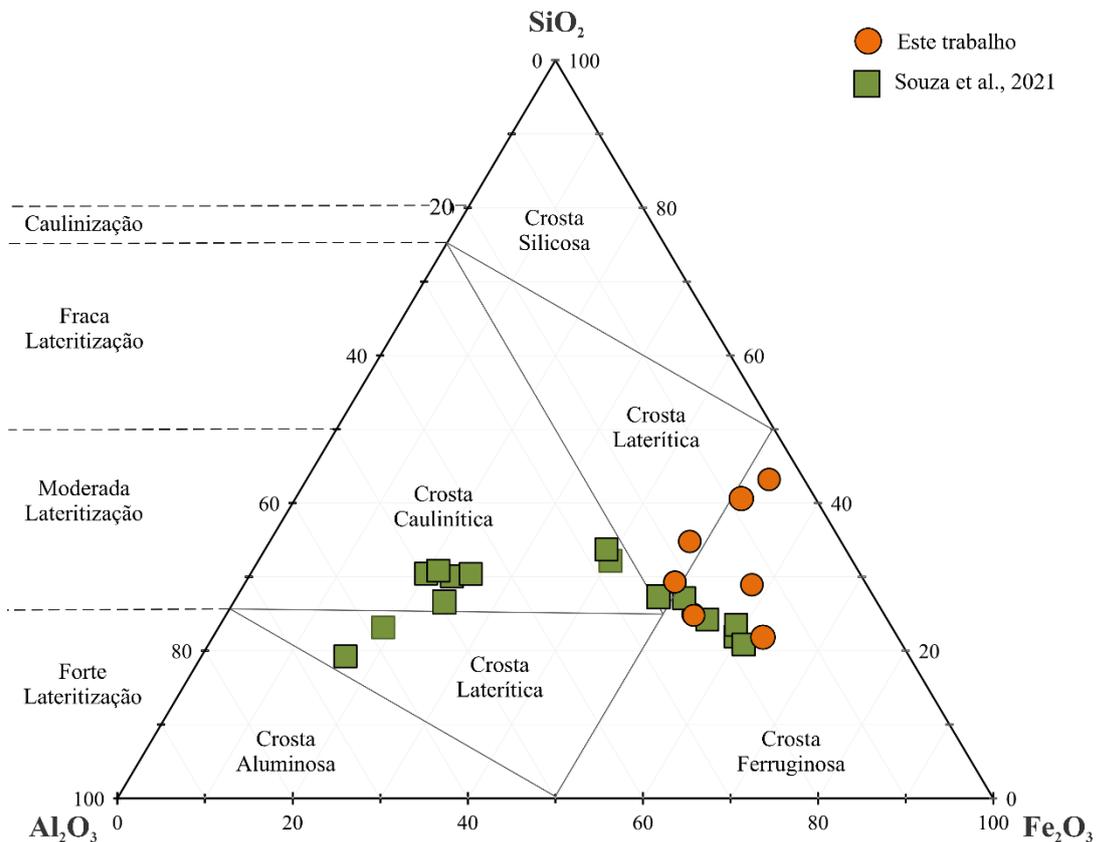


Figura 12. Classificação das crostas lateríticas usando diagrama de SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 de Schellmann, 1983 e Bourman e Ollier, 2002. Neste diagrama são indicadas as amostras de Souza et al. (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Características espectrais da área de estudo

As amostras analisadas apresentam comportamento espectral médio semelhante. A figura 13 mostra as feições de absorção dos óxi-hidróxidos de ferro em 450 a 1100 nm,

1870 a 1990 nm e em 2200 nm, e de reflectância entre 1220 e 1400 nm. As feições com concavidade entre 400 e 600 nm estão relacionadas às transferências de carga do Fe (Hunt, 1977; Morris et al., 1985). Feições estreitas e com alta reflectância, em torno de 480 nm, combinadas com as feições em 1900 e 2200 nm, indicam goethita, enquanto as mais largas e com menor refletância, em 550 nm, indicam hematita (Demattê et al., 2004). As feições centradas em 2200 e 2265 nm são atribuídas às vibrações não fundamentais do Al–O, indicando caulinita e gibbsita, respectivamente (Menezes et al., 2019).

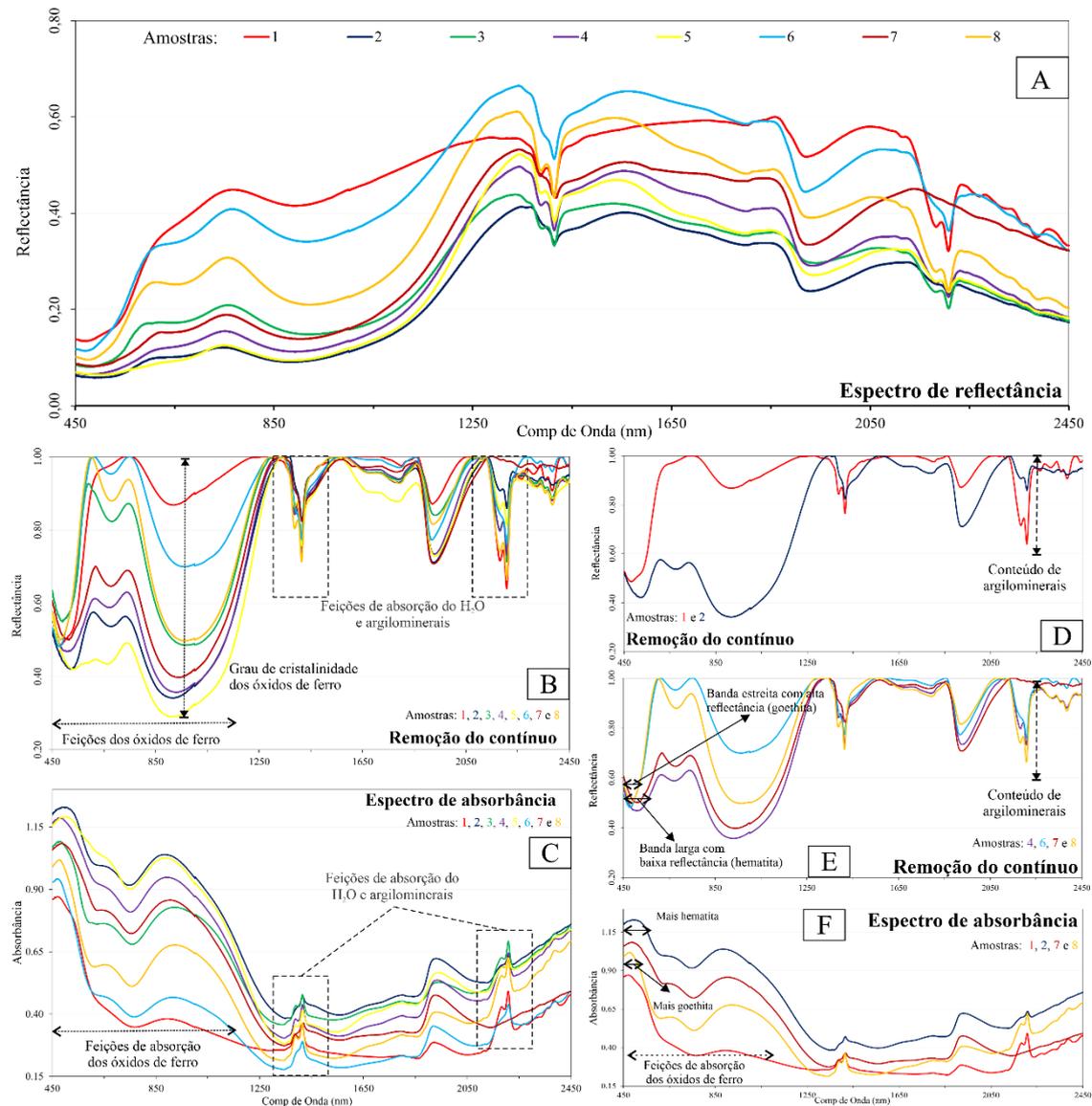


Figura 13. A: Curvas de refletância espectral das crostas lateríticas e solo. Principais feições de diagnóstico em 400 e 600 nm para óxidos de ferro, 1400 nm e 1750–1850 nm para OH, 2200 nm e 2265nm para AlOH. B: remoção do contínuo espectral com o desempenho das formas dos óxidos de ferro, como grau de cristalinidade e feições de H₂O dos argilominerais em 1400nm e 2200nm. C: Os valores de absorbância são maiores na região do visível, nas feições diagnósticas dos óxidos de ferro. D e E: Espectros com remoção do contínuo espectral para as amostras 1,2,4,6,7 e 8. F: espectros de absorbância das amostras 1,2,7 e 8.

O comportamento espectral do solo (amostra 1) é característico de solos com baixos teores de matéria orgânica, tendo em vista o elevado albedo e formato côncavo do espectro (Madeira Netto e Baptista, 2000; Menezes et al., 2019). Na região do SWIR é observada a presença de caulinita, centrada em 2200 nm, mas sem feições indicativas de gibbsita em 2265 nm. As amostras de crostas lateríticas 6 e 8 têm mais goethita, devido a maior profundidade das feições estreitas em 490, 690 nm e 1000 nm. As amostras 2, 3, 4, 5 e 7 têm, provavelmente, mais hematita, com feições de absorção mais largas em 505 e 940 nm. A amostra 7 não apresenta feição de absorção entre 2100 e 2300 nm, apesar do DRX indicar gibbsita (figura 11). As amostras 2, 3, 4 e 5 têm maior absorção em torno de 2265 nm, indicando gibbsita, apesar da menor reflexão de 002 no DRX (figura 11). Os dados de espectroscopia (figura 13) e DRX (figura 11) mostram que hematita e goethita são os principais minerais presentes nas crostas lateríticas e solo analisados.

4.2. Mapeamento regolito laterítico em escala regional

Os métodos e técnicas descritos resultaram em três mapas preditivos do regolito laterítico para cada sensor adotado: 1) Mapa preditivo de matemáticas de bandas, 2) Mapa preditivo DPCA e 3) Mapa preditivo IOM, com 30 m e 20 m de resolução para os mapas com Landsat-8 e Sentinel-2, respectivamente. A figura 14 mostra o mapa preditivo de matemática de bandas. Os pixels vermelhos e laranjas, no centro-sul dos mapas, evidenciam as áreas de Fe^{3+} e Fe^{2+} , refletidas na razão de bandas 4/2 das imagens Landsat-8 e Sentinel-2, portanto, as áreas de crostas lateríticas. Os pixels verdes e amarelos, no centro-norte dos mapas, mapeiam as vibrações do Al-OH , $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{-OH}$, alusivas aos argilominerais e discriminadas pelo índice $(6/7)/(5/4)$, no Landsat-8 e $(11/12)/(8/4)$, no Sentinel-2. Ocorrem nas regiões de saprólito, mosqueado e solo. Os pixels azuis, no oeste e extremo norte dos mapas, representam as vibrações do Si-OH , relacionadas aos silicatos e identificadas pela razão 4/7, no Landsat-8 e 4/12, no Sentinel-2. Equivalem às áreas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados.

Os mapas preditivos das unidades do regolito laterítico com as matemáticas de bandas mostram concordância moderada com os dados de campo, como indicam os valores de acurácia global = 72,61%, $\kappa = 0,54$ e $t = 0,60$, para as imagens Landsat-8, muito semelhantes à acurácia global = 70,48%, $\kappa = 0,51$ e $t = 0,57$, observadas nas imagens Sentinel-2 (tabela 6). A razão de bandas 4/2 para o Fe^{3+} e Fe^{2+} obteve melhor acurácia individual com as imagens Landsat-8 (71%), comparado aos dados Sentinel-2

(66%) (tabela 7), mesmo com a resolução espacial e espectral mais alta do Sentinel-2, especialmente na faixa do azul, que tem melhor resposta na identificação de minerais de Fe (Ge et al., 2020). As áreas mapeadas pelas matemáticas de bandas apresentaram valores de acurácia próximos aos observados por Souza et al. (2021), na região sudoeste do mapa, indicando que a técnica também é eficaz para o mapeamento de áreas maiores.

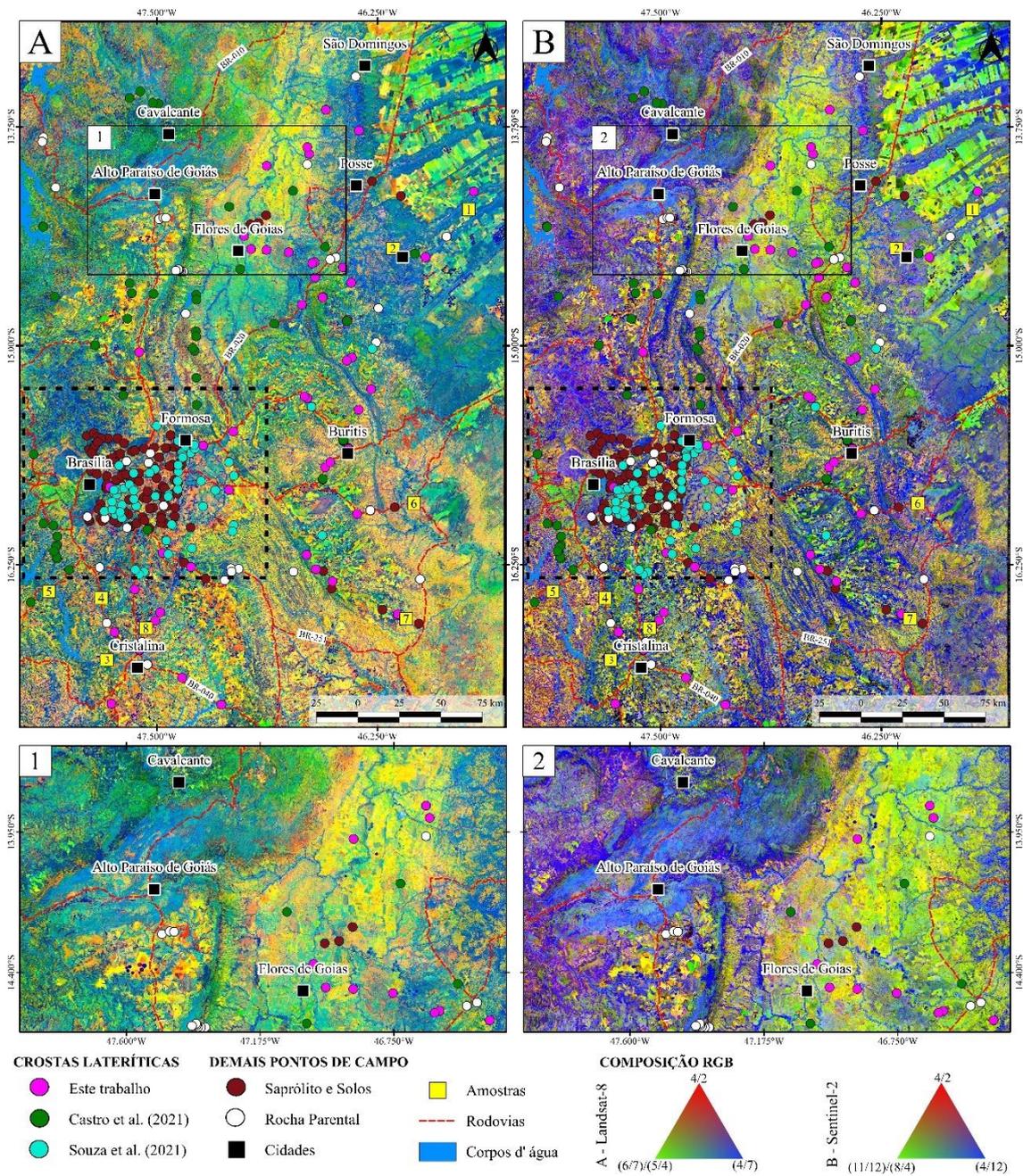


Figura 14. Resultados das matemáticas de bandas para A: Landsat-8 e B: Sentinel-2, em composição RGB falsa cor. Os pixels vermelhos, laranjas e magentas mostram as áreas de ocorrência dos óxi-hidróxidos de ferro, indicativas das crostas lateríticas. Os pixels verdes e amarelos delimitam as áreas dos minerais (Al–OH) e (Fe–Mg)–OH, evidenciando as áreas de saprólito, mosqueado e solo. As áreas de rochas são mapeadas nos pixels azuis. O quadrado tracejado destaca a área de estudo de Souza et al. (2021).

A tabela 4 mostra a matriz de autovetores da análise DPCA gerada a partir das matemáticas de bandas com as imagens Landsat-8 para o mapeamento do regolito laterítico. A matriz de autovetores mostra diferentes valores para cada imagem DPCA, os maiores indicam as contribuições específicas de cada um dos dados de entrada. A DPCA-1 tem forte contribuição positiva (0,9999) originada pelo índice $((5+4)/(5-4))$, identificando nos pixels claros as áreas de vegetação densa. A DPCA-2 tem forte contribuição positiva (0,9999) para o índice $(6/7)/(5/4)$ e evidencia nos pixels claros as zonas de saprólito, mosqueado e solo. A DPCA-3 tem forte contribuição negativa (-0,9999) para a razão de bandas $(4/2)$ e destaca nos pixels escuros as áreas de crostas lateríticas e seus produtos de desmantelamento. A DPCA-4 tem forte contribuição negativa (-0,9998) para a razão de bandas $(4/7)$ e identifica nos pixels escuros as zonas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados.

A figura 15 mostra o mapa DPCA do regolito laterítico com imagens Landsat-8. Foram inseridas a DPCA-3, DPCA-2 e DPCA-4 nos canais do vermelho, verde e azul, respectivamente. O mapa resultante evidencia as áreas de crostas lateríticas e seus produtos em pixels vermelhos, magentas e laranjas, localizados na porção sul do mapa. As áreas de saprólito, mosqueado e solo são discriminadas em pixels verdes e amarelos, especialmente na região centro-leste do mapa, nas áreas de solo exposto. As áreas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados, são identificadas pelos pixels azuis. Esse mapa preditivo teve forte concordância com os dados de campo, com valores de acurácia global = 76,60%, $\kappa = 0,60$ e $t = 0,66$ (tabela 6).

Tabela 4. Matriz de autovetores e autovalores derivada da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em imagens Landsat-8.

Autovetores					
	(4/2)	(6/7)/(5/4)	(4/7)	(5-4)/(5+4)	Autovalores
DPCA 1	-0,0013	-0,0064	0,0012	<u>0,9999</u>	11,0649
DPCA 2	0,0030	<u>0,9999</u>	-0,0023	0,0064	7,4590
DPCA 3	<u>-0,9999</u>	0,0030	0,0009	-0,0013	2,2622
DPCA 4	-0,0009	-0,0023	<u>-0,9998</u>	0,0012	0,5185
Total					20,8381

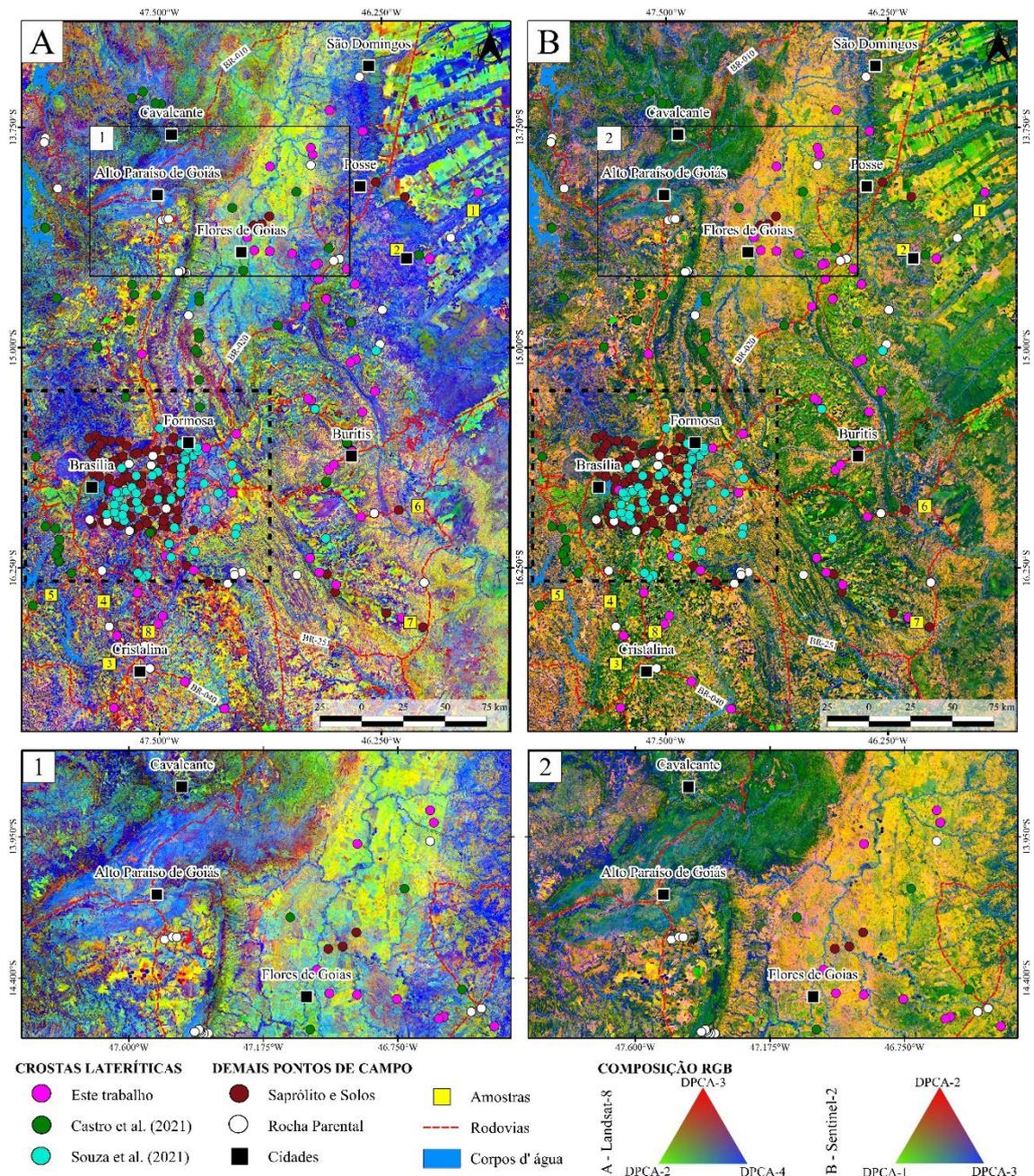


Figura 15. Resultados da análise de componentes principais direcionada (DPCA) para A: Landsat-8 e B: Sentinel-2, em composição RGB falsa cor. Destaca as áreas de crostas lateríticas em pixels vermelhos, magentas e laranjas. As áreas de saprólito, mosqueado e solo são mapeadas em pixels verdes e amarelos. As áreas de rochas são mapeadas nos pixels em azul. O mapa com as imagens Landsat-8 é semelhante ao mapa com as imagens Sentinel-2. O quadrado tracejado destaca a área de estudo de Souza et al. (2021).

A tabela 5 mostra a matriz de autovetores da análise DPCA gerada a partir das matemáticas de bandas com as imagens Sentinel-2. A DPCA-1 tem forte contribuição positiva (0,9826) do índice (11/12)/(8/4), destacando como pixels claros as áreas de saprólito, mosqueado e solo. A DPCA-2 tem forte contribuição negativa (-0,9540) para a razão de bandas (4/2), identificando nos pixels escuros as áreas de crostas lateríticas e

seus produtos de desmantelamento. A DPCA-3 tem forte contribuição negativa (-0,9634) da razão de bandas (4/12), discriminando nos pixels escuros as áreas de rochas, como metarenitos, metassiltitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados. A DPCA-4 apresenta forte contribuição negativa (-0,9350), originada a partir do índice (8+4)/(8-4), destacando nos pixels escuros as áreas de vegetação densa.

Tabela 5. Matriz de autovetores e autovalores derivada da análise de componentes principais direcionada (DPCA) em imagens Sentinel-2.

Autovetores	(4/2)	(11/12)/(8/4)	(4/12)	(8+4)/(8-4)	Autovalores
DPCA 1	0,0242	<u>0,9826</u>	-0,1554	-0,0985	0,7124
DPCA 2	<u>-0,9540</u>	0,0596	0,0442	0,2902	0,1348
DPCA 3	-0,1093	-0,1676	<u>-0,9634</u>	-0,1780	0,0810
DPCA 4	-0,2778	-0,0531	0,2136	<u>-0,9350</u>	0,0136
Total					0,9420

A figura 15 mostra o mapa preditivo DPCA com imagens Sentinel-2 para o mapeamento do regolito laterítico. Foram inseridas a DPCA-2, DPCA-1 e DPCA-3, nos canais do vermelho, verde e azul, respectivamente. Esse mapa obteve resultado semelhante ao mapa preditivo DPCA com imagens Landsat-8. As crostas lateríticas e seus produtos são mapeados nos pixels vermelhos e laranjas, as áreas de saprólito, mosqueado e solo são mapeadas nos pixels verdes e amarelos, e as áreas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados, nos pixels azuis. A forte acurácia desse mapa (acurácia global = 75,27%, $\kappa = 0,59$ e $t = 0,64$) (tabela 7) é próxima a do Landsat-8 (acurácia global = 76,60%, $\kappa = 0,60$ e $t = 0,66$), evidenciando a boa aplicação da DPCA em dados multiespectrais para o mapeamento do regolito em ambiente tropical.

A figura 16 mostra o mapa preditivo IOM com imagens Landsat-8 e Sentinel-2 para o mapeamento do regolito laterítico. Se observa bom contraste entre o regolito laterítico, a vegetação nativa e os pixels não classificados. A tabela 8 mostra que do total da área mapeada (133 mil km²), no mapa gerado com imagens Landsat-8, 28.554 km² correspondem às crostas lateríticas (21,46%), 24.906 km² são de saprólito, mosqueado e solo (18,71%), 27.586 km² retratam as áreas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados (20,73%) e cerca de 52.057 km² (39,10%) retratam a vegetação (41.188 km²) e os pixels não classificados (10.849 km²), ocupando a maioria da área mapeada. Esse mapa teve acurácia global = 75,53%, $\kappa = 0,56$ e $t = 0,65$ (tabela 6), um pouco menor que as outras duas técnicas usadas com este sensor.

Tabela 6. Matriz de confusão para os mapas preditivos do regolito laterítico elaborados a partir das matemáticas de bandas, DPCA e IOM, derivados de imagens Landsat-8 OLI/TIRS.

Mapa preditivo Matemática de bandas		Pixel detectado		
Observações de campo	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
1. Crostas lateríticas	156	42	19	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	19	85	10	114
3. Rochas	2	11	32	45
Total	177	138	61	376
Acurácia global = 72,61%		Kappa = 0,54		Tau = 0,60

Mapa preditivo DPCA		Pixel detectado		
Observações de campo	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
1. Crostas lateríticas	165	43	9	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	14	90	10	114
3. Rochas	2	10	33	45
Total	181	143	52	376
Acurácia global = 76,60%		Kappa = 0,60		Tau = 0,66

Mapa preditivo IOM		Pixel detectado		
Observações de campo	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
1. Crostas lateríticas	174	34	9	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	28	79	7	114
3. Rochas	10	4	31	45
Total	212	117	47	376
Acurácia global = 75,53%		Kappa = 0,56		Tau = 0,65

Tabela 7. Matriz de confusão para os mapas preditivos do regolito laterítico elaborados a partir das matemáticas de bandas, DPCA e IOM, derivados de imagens Sentinel-2 MSI.

Mapa preditivo Matemática de bandas		Pixel detectado		
Observações de campo	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
1. Crostas lateríticas	144	49	24	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	13	89	12	114
3. Rochas	2	11	32	45
Total	159	149	68	376
Acurácia global = 70,48%		Kappa = 0,51		Tau = 0,57

Mapa preditivo DPCA		Pixel detectado		
Observações de campo	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
1. Crostas lateríticas	147	53	17	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	13	97	4	114
3. Rochas	2	4	39	45
Total	162	154	60	376
Acurácia global = 75,27%		Kappa = 0,59		Tau = 0,64

Mapa preditivo IOM	Pixel detectado			
	1. Crostas Lateríticas	2. Saprólito, Mosqueado e Solo	3. Rochas	Total
Observações de campo				
1. Crostas lateríticas	171	32	14	217
2. Saprólito, mosqueado e solo	32	76	6	114
3. Rochas	6	5	34	45
Total	209	113	54	376
Acurácia global = 74,73%		Kappa = 0,55		Tau = 0,63

O mapa preditivo IOM com Sentinel-2 (figura 16) mostra área menor para as crostas lateríticas (27.604 km²; 20,74%) e para saprólito, mosqueado e solo (21.804 km²; 16,38%), área maior para a classe de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados (29.837 km²; 22,42%) e o restante da área mapeada (40,45%) corresponde a vegetação (37.403 km²) e aos pixels não classificados (16.435 km²) (tabela 9). Esse mapa teve acurácia global = 74,73%, $\kappa = 0,55$ e $t = 0,63$ (tabela 7). As diferenças entre os mapas preditivos IOM com Landsat-8 e Sentinel-2 são mais expressivas nas áreas de crostas lateríticas e saprólito, mosqueado e solo.

Tabela 8. Valores de classificação gerados pela equação 1 ($\Sigma = 1 \times \text{vegetação} + 10 \times \text{rochas} + 100 \times \text{saprólito, mosqueado e solo} + 1000 \times \text{crostas lateríticas}$) e área do mapa preditivo IOM com Landsat-8.

Classe	Valores do raster	Contagem de pixels	Área (km ²)	%
1. Crostas lateríticas	1000; 1100; 1110	33.140.753	28.554,81	21,46
2. Saprólito, mosqueado e solo	100; 1100; 1101	28.820.992	24.906,52	18,71
3. Rochas	10; 11; 1010	31.921.444	27.586,69	20,73
4. Vegetação	1; 11; 1101; 1111	47.718.064	41.188,65	30,95
5. Não classificados	0	11.990.185	10.849,33	8,15
Total		153.591.438	133.086,00	100,00

Tabela 9. Valores de classificação gerados pela equação 1 ($\Sigma = 1 \times \text{vegetação} + 10 \times \text{rochas} + 100 \times \text{saprólito, mosqueado e solo} + 1000 \times \text{crostas lateríticas}$) e área do mapa preditivo IOM com Sentinel-2.

Classe	Valores do raster	Contagem de pixels	Área (km ²)	%
1. Crostas lateríticas	1000; 1100; 1110	31.989.271	27.604,42	20,74
2. Saprólito, mosqueado e solo	100; 1100; 1101	25.226.965	21.804,95	16,38
3. Rochas	10; 11; 1010	34.543.861	29.837,52	22,42
4. Vegetação	1; 11; 1101; 1111	43.333.657	37.403,28	28,10
5. Não classificados	0	18.497.880	16.435,83	12,35
Total		153.591.634	133.086,00	100,00

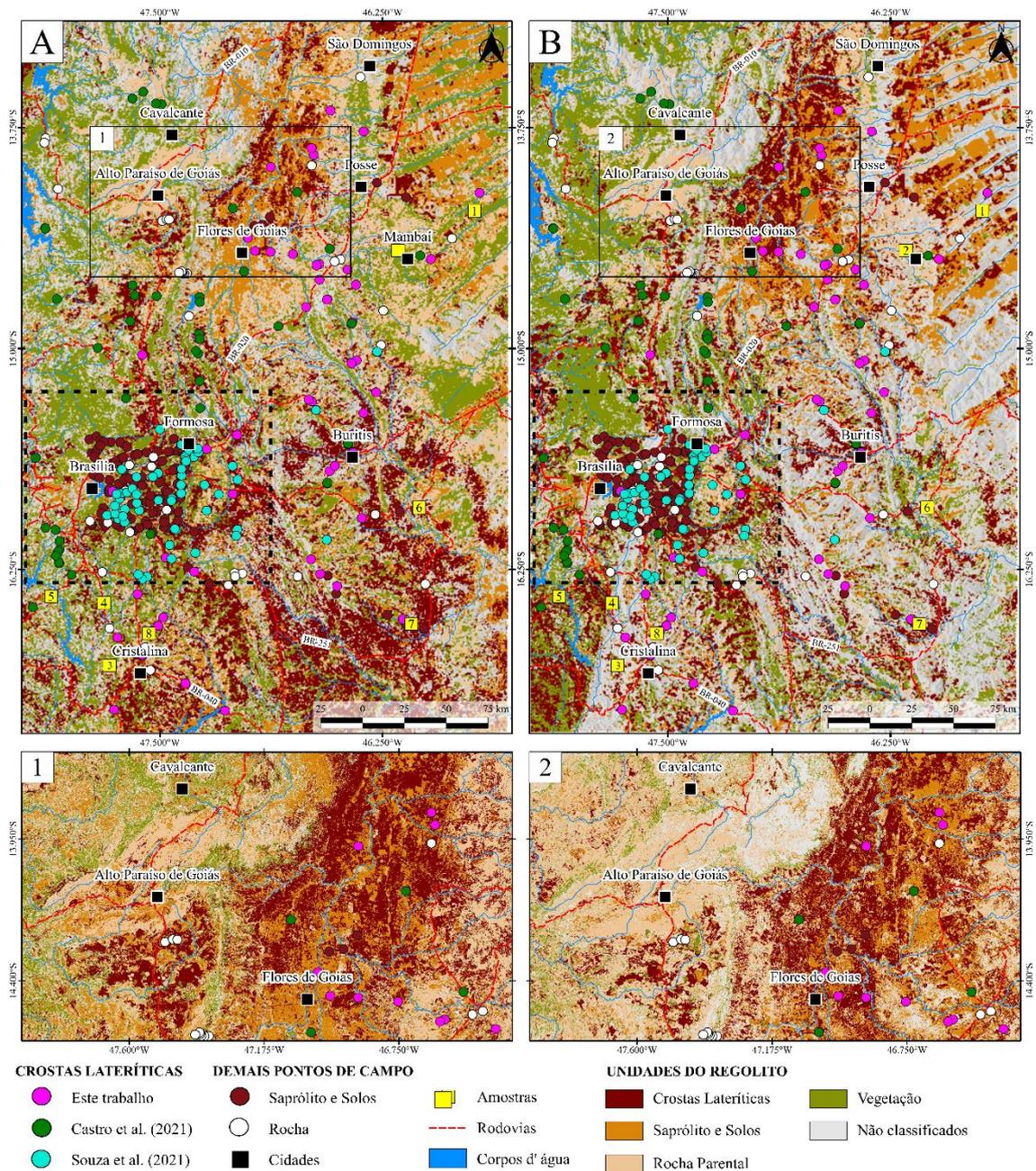


Figura 16. Resultados da sobreposição de índices (IOM) para A: Landsat-8 e B: Sentinel-2. A partir das ponderações adotadas na equação (1). Os mapas mostram as crostas lateríticas em vermelho, o saprólito, mosqueado e solo, em amarelo e as áreas de rochas, em azul. A vegetação densa é identificada em verde e os pixels não classificados, em cinza. O quadrado tracejado destaca a área de estudo de Souza et al. (2021).

Todas essas informações acerca dos mapas preditivos, mostram que as três técnicas aplicadas para a identificação das características do regolito laterítico foram mais eficientes em imagens Landsat-8, comparado às imagens Sentinel-2. Apesar disso, as matrizes de confusão indicam que os dados Sentinel-2 melhor destaca as áreas de rochas, como metarenitos, quartzitos, vulcanossedimentares e metaconglomerados (tabelas 6 e 7).

De modo geral, as áreas de 1) crostas lateríticas e seus produtos, 2) saprólito, mosqueado e solo e 3) rochas foram bem discriminadas e mapeadas pelas três técnicas adotadas. Dentre as técnicas, a DPCA foi a que obteve os maiores valores de acurácia, apesar da expectativa de melhora na acurácia com a integração e ponderação de dados pelo IOM.

Além disso, as diferentes de resoluções espaciais e espectrais dos sensores Landsat-8 e Sentinel-2 tiveram grande influência nos resultados obtidos, em especial na identificação e mapeamento das feições relativas às transferências de carga do Fe^{3+} e Fe^{2+} e às vibrações do Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH e Si-OH, com as bandas 2 e 4 do Landsat-8 e Sentinel-2, e bandas 6 e 7 do Landsat-8 e bandas 11 e 12 do Sentinel-2, respectivamente. Apesar de cobrirem a mesma faixa do espectro, visível (VIS) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), essas bandas abrangem intervalos espectrais distintos, de modo que exercem grande influência na identificação das principais feições espectrais dos minerais.

5. CONCLUSÕES

Esse estudo, que discute a eficácia da aplicação de matemáticas de bandas, componentes principais direcionada (DPCA) e sobreposição de índices (IOM) em dados multiespectrais Landsat-8 e Sentinel-2, teve bom desempenho no mapeamento do regolito laterítico na área de estudo. Apesar da expectativa de aumento na capacidade de reconhecimento de óxi-hidróxidos de ferro com as matemáticas de bandas em imagens Sentinel-2 (acurácia global = 70,48%, $\kappa = 0,51$ e $t = 0,57$), as Landsat-8 foram um pouco mais eficientes no mapeamento com esta técnica, alcançando acurácia global = 72,61%, $\kappa = 0,54$ e $t = 0,60$. Para as demais técnicas utilizadas, os mapas com as imagens Landsat-8 e Sentinel-2, apresentaram acurácia muito próxima. Se ressalta que as unidades do regolito laterítico têm basicamente os mesmos minerais, mas com proporções diferentes entre si, isso pode dificultar a discriminação destas unidades em imagens multiespectrais.

Dentre os três métodos matemáticos e estatísticos utilizados, o mais eficiente foi a DPCA com acurácia forte em ambos os sensores (acurácia global > 75% e valores de kappa e tau próximos a 0,60), comparado às acurácias moderadas das matemáticas de bandas e IOM. Desta forma, os mapas preditivos gerados somente pelas matemáticas de bandas podem ser otimizados com a DPCA. Os mapas preditivos IOM tiveram bons resultados nos dois sensores, mas necessita de calibração do modelo para maior correspondência com os dados de campo, tendo em vista o pouco ganho obtido com a técnica. A DPCA se mostrou superior para o mapeamento do regolito na área de estudo.

Portanto, este estudo demonstra que a abordagem multiespectral/multi-sensor é promissora no mapeamento do regolito em regiões tropicais, onde rochas e produtos do intemperismo afloram lado a lado. As técnicas adotadas se mostram eficientes tanto em áreas pequenas como as maiores, a exemplo deste estudo que envolveu 133 km². Entretanto, como as imagens multiespectrais estão sujeitas às várias interferências, como a vegetação, as condições atmosféricas, umidade do solo e sombreamento do terreno, é necessário testar os métodos em cada área selecionada, além da adoção de modelos de correção atmosférica mais robustos e atenção às diferenças espectrais e espaciais entre os sensores utilizados, de modo a otimizar os mapeamentos e classificações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília - UnB e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio técnico e físico. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (bolsa n° 131719/2020-3) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) (bolsa n° 193001519/2016), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Abrams, M., Ashley, R., Rowan, L., Goetz, A., Kahle, A. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36µm. *Geology*, 5, p.713-718.
- Abrams, M., Brown, D., Lepley, L., Sadowski, R., 1983. Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology*. 78, p. 591–604.
- Adiri, Z., Lhissou, R., El Harti, A., Jellouli, A., Chakouri, M. 2020. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications. *Ore Geol. Rev.*, 117 <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103332>.
- Anand, R., Paine, M. 2002. Regolith geology of Yilgarn Craton, western Australia: Implication for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49, p. 3-162.
- Arhin, E., Jenkin, G., Cunningham, D., Nude, P. 2015. Regolith mapping of deeply weathered terrain in savannah regions of the Birimian Lawra Greenstone Belt, Ghana. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, p. 194-207.
- Augustin, F. 2011. Mapping the Regolith and Its Mineralogy from The Tick Hill Region, Mt. Isa, Queensland using HyMap and ASTER Remote Sensing Data. (Tese Doutorado). Curtin University, Bentley. 186 p.
- Augustin, F. 2017. ASTER Mineral Classification for Regolith Mapping in Tick Hill Mount Isa, Northwest Queensland. *Indones. J. Geosci.*, 4, p. 97-109.
- Bonham-Carter, G., 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Oxford.

- Brites, R., Soares, V., Ribeiro, C. 1996. Verificação da exatidão em classificações de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. *Revista Árvore*, 20, p. 415-424.
- Butt, C. 2004. Understanding the regolith in tropical and subtropical terrains: the key to exploration under cover. *SEG*, p. 74-78.
- Campos, J., Dardenne, M. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 2, p. 269-282.
- Campos, J., Dardenne, M., Freitas-Silva, F., Martins-Ferreira, M. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Braz. J. Geol.*, 43, p. 461-476.
- Carranza, E., Hale, M. 2001. Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Nat. Resour. Res.*, 10, p. 125–136.
- Carranza, E., Hale, M. 2002. Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. *Int. J. Remote Sens.*, 23, p. 4827-4852.
- Carrino, T., Silva, A., Botelho, N., da Silva, A. 2011. Discriminação de áreas de espesso regolito do leste do Estado do Amazonas usando estatística multivariada, algoritmo hiperespectral e modelagem de dados espaciais. *Revista Brasileira de Geofísica*. 29, p. 155–172.
- Caruso, A., Clarke, K., Tiddy, C., Delean, S., Lewis, M. 2018. Objective regolith-landform mapping in a regolith dominated terrain to inform mineral exploration. *Geosc.*, 8, p. 1-19.
- Caruso, A., Clarke, K., Tiddy, C., Lewis, M. 2021. Airborne hyperspectral characterization of hydrothermal alteration in a regolith-dominated terrain, southern Gawler Ranges, South Australia. *Aust. J. Earth Sci.*, 68, p. 590-608.
- Castro, R., Horbe, A., Cherem, L. 2022. The Brazilian Midwest lateritic domains: regolith features and dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, 118, p.1-13.
- Clark, R., Roush, T. 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 89, p. 6329-6340.
- Clark, R., Rencz, A. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Manual of remote sensing*, 3, p. 3-58.
- Cohen, D., Kelley, D., Anand, R., Coker, W. 2010. Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10, p. 3-16.
- Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences*, second ed. Erlbaum, Hillsdale, NJ. Doi: <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- Costa, M. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, 6, p. 79-104.
- Costa, M. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. Licht OAB, Mello CSB, Silva CR, orgs. *Prospecção geoquímica-depósito minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro: SBGq e SGB, p. 1-46.
- Craig, M.A., Wilford, J.R., Tapley, I.J., 1999. Regolith-landform mapping in the Gawler Craton – an alternative approach. *MESA Journal*, 12, p. 17–21.
- Crósta, A., Moore, J., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. *Proc. 7th Themat. Conf. Remote Sens. Explor. Geol. Calgary*, p. 1173–1187.
- Dardenne M., Freitas-Silva F., Souza J., Campos J. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. *In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Resumos*, p. 26.

- Dauth, C. 1997. Airborne magnetic, radiometric and satellite imagery for regolith mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. *Exploration Geophysics*, 28, p. 199-203.
- Davari, M., Karimi, S., Bahrami, H., Hossaini, S., Fahmideh, S. 2021. Simultaneous prediction of several soil properties related to engineering uses based on laboratory Vis-NIR reflectance spectroscopy. *Catena*, 197, p. 1-12.
- De Boissieu, F., Sevin, B., Cudahy, T., Mangeas, M., Chevrel, S., Ong, C., Despinoy, M. 2018. Regolith-geology mapping with support vector machine: A case study over weathered Ni-bearing peridotites, New Caledonia. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 64, p. 377-385.
- Deller, M. 2006. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER, and ALI data - examples from Eritrea and Arabia. *Intern. Journal Rem. Sens.*, 27, p. 2389-2409.
- Demattê, J., Campos, R., Alves, M., Fiorio, P., Nanni, M. 2004. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. *Geoderma*, 121, p. 95-112.
- Dickson, B., Fraser, S., Kinsey-Henderson, A. 1996. Interpreting aerial gamma-ray surveys utilizing geomorphological and weathering models. *J. Geochem. Explor.*, 57, p. 75-88.
- Du, P., Xia, J., Zhang, W., Tan, K., Liu, Y., Liu, S. 2012. Multiple classifier system for remote sensing image classification: A review. *Sensors*, 12, p. 4764-4792.
- Du, X., Zhou, K., Cui, Y., Wang, J., Zhang, N., Sun, W. 2016. Application of fuzzy analytical hierarchy process (AHP) and prediction-area plot for mineral prospectivity mapping: a case study from the Dananhu metallogenic belt, Xinjiang, NW China. *Arab. J. Geosci.*, 9, p. 2-15.
- Ducart, D., Silva, A., Toledo, C., Assis, L. 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Braz. J. Geol.*, 46, p. 331-349.
- Espíndola, C., Daniel, L. 2008. Laterita e Solos Lateríticos no Brasil. *Boletim Técnico da FATECSP BT/24*, p. 21-24.
- Farooq, S., Govil, H. 2014. Mapping Regolith and Gossan for Mineral Exploration in the Eastern Kumaon Himalaya, India using Hyperion data and object-oriented image classification. *Advances in Space Research*, 53, p. 676-1685.
- Fitzgerald, R., Lees, B. 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote sensing of Environment*, 47, p. 362-368.
- Forson, E., Menyeh, A., Wemegah, D. 2021. Mapping lithological units, structural lineaments, and alteration zones in the Southern Kibi-Winneba belt of Ghana using integrated geophysical and remote sensing datasets. *Ore Geol. Rev.*, 137, 104271. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104271>.
- Fraser, S., Green, A. 1987. A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal of Remote Sensing*, 8, p. 525-532.
- Fraser, S. 1991. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study. *International Journal of Remote Sensing*, 12, p. 635-614.
- Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Wang, F., Zhao, M., Ding, H. 2020. Assessment of the Capability of Sentinel-2 Imagery for Iron-Bearing Minerals Mapping: A Case Study in the Cuprite Area, Nevada. *Remote Sensing*, 12, p. 1-16.
- Girija, R., Mayappan, S. 2019. Mapping of mineral resources and lithological units: A review of remote sensing techniques. *International Journal of Image and Data Fusion*, 10, p. 79-106.

- Gomez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P., Wackerle, R. 2005. Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30, p. 97-108.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, p. 18-27.
- Henderson III, F., Penfield, G., Grubbs, D. 1984. Satellite Remote Sensing for Aluminum and Nickel Laterites. *Recent Advances in Civil Space Remote Sensing*, 481, p. 43-51.
- Honarmand, M., Ranjbar, H., Shahabpour, J. 2013. Combined use of ASTER and ALI data for hydrothermal alteration mapping in the northwestern part of the Kerman magmatic arc, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 34, p. 2023-2046.
- Hu, B., Xu, Y., Wan, B., Wu, X., Yi, G. 2018. Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 101, p. 384-397.
- Hunt, G. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42, p. 501-513.
- Ibrahim, E., Barnabé, P., Ramanaidou, E., Pirard, E. 2018. Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in New Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, p. 653-665.
- Iglesias, M., Uhlein, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geology*, 39, p. 256-266.
- Iza, E., Horbe, A., Castro, C., Herrera, I. 2018. Integration of geochemical and geophysical data to characterize and map lateritic regolith: an example in the Brazilian Amazon. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, p. 3254-3271.
- Iza, E., Santos, R., Cruz Filho, B. 2020. Integration of Multisource Data to Support the Identification of Lateritic Regolith in Eastern - Bahia, Northeastern Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil* 3, p. 1-24.
- Klecka, W. 1980. *Discriminant Analysis*. SAGE Publications, Beverly Hills, California, p. 71.
- Lacerda Filho, J.V., Rezende, A., Silva, A., 1999. *Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, escala 1:500000*. Serviço Geológico do Brasil. Conv. CPRM/METAGO S.A./UnB).
- Landis, J., Koch, G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Source: Biometrics*. 33, p.159–174.
- Langford, R. 2015. Temporal merging of remote sensing data to enhance spectral regolith, lithological and alteration patterns for regional mineral exploration. *Ore Geol. Rev.*, 68, p. 14-29.
- Latrubesse M., Carvalho M. 2006. *Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal*. Secretaria de Indústria Comércio, Superintendência de geologia e mineração, Brasil, p. 1–127.
- Loughlin, W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, p. 1163-1169.
- Ma, Z., Redmond, R. 1995. Tau coefficient for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, p.435–439.
- Madeira Netto, J., Baptista, G. 2000. *Reflectância espectral de solos*. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 55p.

- Mahanta, P., Maiti, S. 2018. Regional scale demarcation of alteration zone using ASTER imageries in South Purulia Shear Zone, East India: Implication for mineral exploration in vegetated regions. *Ore Geology Reviews*, 102, p. 846–861.
- Martins, É., Baptista, G. 1999. *Compartimentação geomorfológica do Distrito Federal. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do DF*. Brasília. MMA-SRH, 51p.
- Martins, É. 2000. *Petrografia, mineralogia e geomorfologia de regolitos lateríticos no Distrito Federal. (Tese Doutorado)*. Universidade de Brasília, Brasília. 196p.
- Martins, É., Reatto, A., Carvalho Júnior, O., Guimarães, R. 2004. *Evolução geomorfológica do Distrito Federal*. Planaltina: EMBRAPA Cerrados.
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A., Ghaderi, M. 2017. Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data. *Geosciences Journal*, 21, p. 137-148.
- Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M., Barth, A., Ježek, J., Naba, S. 2018. Automated regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data, Burkina Faso, West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 204, p. 964-978.
- Menezes, P., Almeida, T., Baptista, G. 2019. *Reflectância dos materiais terrestres*. Oficina de textos, 334p.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Pour, A. B., Valizadeh Kamran, K., Feizizadeh, B., Muslim, A., Hossain, M. 2020. Landsat-7 and ASTER remote sensing satellite imagery for identification of iron skarn mineralization in metamorphic regions. *Geocarto Intern.*, p. 1-28.
- Moraes, J. 2014. *Geodiversidade do Estado de Goiás e do Distrito Federal*. CPRM, Goiânia.
- Morris, R., Lauer Jr, H., Lawson, C., Gibson Jr, E., Nace, G., Stewart, C. 1985. Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (α -Fe₂O₃), maghemite (γ -Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), goethite (α -FeOOH), and lepidocrocite (γ -FeOOH). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90, p. 3126-3144.
- Mulder, V., De Bruin, S., Schaepman, M. E., Mayr, T. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma*, 162, p. 1-19.
- Mwaniki, M., Matthias, M., Schellmann, G. 2015. Application of remote sensing technologies to map the structural geology of central Region of Kenya. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, p. 1855-1867.
- Næsset, E. 1996. Conditional tau coefficient for assessment of producer's accuracy of classified remotely sensed data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 51, p.91-98.
- Nascimento, M. 1991. *Geomorfologia do Estado de Goiás*. Boletim Goiano de Geografia. 12, p. 1-22.
- Nahon, D., Tardy, Y. 1992. The ferruginous laterites. *In: C.R.M. Butt, H. Zeegers (Eds.), Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier, 4, p. 40-55.
- Noori, L., Pour, A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C., Honarmand, M. 2019. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic Vein-Type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), north Iran. *Remote Sensing*, 11, p.2-24.
- Ntori, C., Arhin, E., Sulemana, I., Boateng, D. 2019. Characterization of Regolith Types and its Impact on Gold Anomaly in Highly Weathered Terrains Using Multiple Dataset. *International Journal of Geography and Geology*, 8, p. 137-152.

- Osinowo, O., Gomy, A., Isseini, M. 2021. Mapping hydrothermal alteration mineral deposits from Landsat 8 satellite data in Pala, Mayo Kebbi Region, Southwestern Chad. *Scientific African*, 11, p. e00687. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00687>.
- Ourhizif, Z., Algouti, A., Haacht, F. 2019. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla district south high atlas of Marrakech. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 42, p. 1255-1262.
- Peixoto, S., Horbe, A., Soares, T., Freitas, C., de Sousa, E., Figueiredo Iza, E. 2021. Boolean and fuzzy logic operators and multivariate linear regression applied to airborne gamma-ray spectrometry data for regolith mapping in granite-greenstone terrain in Midwest Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, p. 1-14.
- Pour, A. B., Hashim, M. 2015. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 9, p. 155-166.
- Pour, A., Park, T., Park, Y., Hong, J., Pradhan, B. 2019. Fusion of DPCA and ICA algorithms for mineral detection using Landsat-8 spectral bands. *In: IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 6067-6070.
- Pour, A., Zoheir, B., Pradhan, B., Hashim, M. 2021. Editorial for the Special Issue: Multispectral and hyperspectral remote sensing data for mineral exploration and environmental monitoring of mined areas. *Remote Sensing*, 13, p. 1-6.
- Pour, A., Park, T., Park, Y., Hong, J., Muslim, A., Laufer, A., Crispini, L., Pradhan, B., Zoheir, B., Rahman, O., Hashim, M., Hossain, M. 2021. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland. *Remote Sens.* 11, p.179-217.
- Rockwell, B., Hofstra, A. 2008. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data—Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 4, p.218-246.
- Rockwell, B. 2012. Description and validation of an automated methodology for mapping mineralogy, vegetation, and hydrothermal alteration type from ASTER satellite imagery with examples from the San Juan Mountains, Colorado (No. 3190). *US Geological Survey Scientific Investigations*, 43p.
- Rodrigues, J. 2008. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí - Um estudo de zircões detríticos e Idades modelo Sm-Nd. (Tese Doutorado) Universidade de Brasília, Brasília. 141p.
- Rousse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. NASA SP-351, p. 301-317.
- Saadat, H., Bonnell, R., Sharifi, F., Mehuys, G., Namdar, M., Ale-Ebrahim, S. 2008. Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. *Geomorphology*, 100, p. 453-464.
- Sabins, F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 14, p. 157-183.
- Scott, K., Pain, C. 2009. *Regolith Science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 462p. Doi: 10.1071/9780643098268.

- Shebl, A., Abdellatif, M., Elkhateeb, S. O., Csámer, Á. 2021. Multisource data analysis for gold potentiality mapping of Atalla area and its environs, Central Eastern Desert, Egypt. *Minerals*, 11, p. 2-19.
- Sherman, D., Burns, R., Burns, V. 1982. Spectral characteristics of the iron oxides with application to the Martian bright region mineralogy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87, p. 10169-10180.
- Soe, M., Won-In, K., Takashima, I., Charusiri, P. 2008. Lateritic soil mapping of the Phrae basin, northern Thailand using satellite data. *Science Asia*, 34, p. 307-316.
- Souza, M., Horbe, A., Silva, B., Peixoto, S., Castro, R. 2021. Regolith LANDSAT-8/OLI and Hyperion/EO-1 images classification in Midwest of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, p. 1-14.
- Story, M., Congalton, R. 1986. Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 52, p. 397-399.
- Tanizaki, M., Campos, J., Dardenne, M. 2015. Estratigrafia do Grupo Araí: registro de rifteamento paleoproterozóico no Brasil Central. *Brazilian Journal of Geology*, 45, p. 95-108.
- Tangestani, M., Mazhari, N., Agar, B., Moore, F. 2008. Evaluating Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran nt. *J. Remote Sens.*, 29, p. 2833-2850.
- Tapley, I., Gozzard, J. 1992. Regolith-landform mapping in the Lawlers District. Report 1: Aerial photographic interpretation and Landsat Thematic Mapper processing for mapping regolith-landforms, CSIRO Australia Division of Exploration and Mining, Perth. Report 239R CSIRO/AMIRA Project P243.
- Tiwari, P., Sen, A., Garg, R. 2011. Application of DPCA technique in Khetri copper belt, India for alteration zones. *Asian Journal of Earth Sciences*, 4, p. 54-59.
- Tripathi, M., Govil, H. 2020. Regolith mapping and geochemistry of hydrothermally altered, weathered and clay minerals, Western Jahajpur belt, Bhilwara, India. *Geocarto Int.*, p. 1-17.
- van der Meer, F., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Hecker, C., Bakker, W.; Noomen, M., van der Meijde, M., Carranza, J., de Smeth, J., Woldai, T. 2012. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, p.112-128.
- van der Meer, F., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F. 2014. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote sensing of environment*, 148, p. 124-133.
- Wambo, J., Pour, A., Ganno, S., Asimow, P., Zoheir, B., Salles, R., Nzenti, J., Pradhan, B., Muslim, A. 2020. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: a case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon. *Ore Geology Reviews*, 122, 103530. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>.
- Wilford, J. 1992. Regolith mapping using integrated Landsat TM imagery and high-resolution gamma-ray spectrometric imagery: Cape York Peninsula. Australian Geological Survey Organization, 42p.
- Wilford, J., Creasey, J. 2002. Landsat thematic mapper. *In: Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration*, p. 6-12.
- Yousefi, M., Carranza, E. 2016. Data-driven index overlay and Boolean logic mineral prospectivity modeling in greenfields exploration. *Natural Resources Research*, 25, p. 3-18.

CAPÍTULO III

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentes técnicas de processamento foram adotadas em imagens multiespectrais e multi-sensores, validadas estatisticamente com dados de campo, que resultaram em três mapas preditivos do regolito laterítico, para cada sensor utilizado: 1 – Mapa preditivo matemática de bandas, 2 – Mapa preditivo DPCA e 3 – Mapa preditivo IOM.

Os mapas preditivos das matemáticas de bandas tiveram acurácia moderada tanto para o Landsat-8 (acurácia global = 72,71%, $\kappa = 0,54$ e $t = 0,60$), como para o Sentinel-2 (acurácia global = 70,48%, $\kappa = 0,51$ e $t = 0,57$), evidenciando precisão similar entre os sensores. O mapa preditivo DPCA, técnica aplicada a partir das matemáticas de bandas, apresentou forte acurácia em ambos os sensores (Landsat-8: acurácia global = 76,60%, $\kappa = 0,60$ e $t = 0,66$; Sentinel-2: acurácia global = 75,27%, $\kappa = 0,59$ e $t = 0,64$). O mapa preditivo IOM, gerado com as imagens DPCA, apresentou acurácia global = 75,53%, $\kappa = 0,56$ e $t = 0,65$ (Landsat-8) e acurácia global = 74,73%, $\kappa = 0,55$ e $t = 0,63$ (Sentinel-2).

Apesar da boa acurácia, os mapas preditivos com imagens multiespectrais estão sujeitos às várias interferências, como a vegetação, condições atmosféricas, umidade do solo e sombreamento do terreno. Desta forma, se ressalta a importância da adoção de modelos de correção atmosférica mais robustos, bem como atenção às diferenças espectrais e espaciais entre os sensores utilizados. A precisão das classificações pode ser otimizada com a integração de outros dados multifontes, como a espectrometria de raios gama aerotransportada e o uso das bandas TIRS do Landsat-8. Estas bandas na região do termal permitem a melhor identificação das feições espectrais do Si-OH, presentes nos metarenitos e quartzitos da área de estudo. Apesar disto, os resultados evidenciam as diferentes possibilidades do uso das imagens multiespectrais para o mapeamento do regolito laterítico em regiões tropicais, com destaque ao centro-oeste brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M., Ashley, R., Rowan, L., Goetz, A., Kahle, A. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μ m. *Geology*, 5, p. 713-718.
- Abrams, M., Brown, D., Lepley, L., Sadowski, R. 1983. Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology*, 78, p. 591-604.
- Abrams, M., Yamaguchi, Y. 2019. Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration. *Remote Sensing*, 11, p. 2-28.
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., Bachaoui, E. 2016. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10, p. 1-14.

- Anand, R., Butt, C. 1988. The terminology and classification of the deeply weathered regolith, Discussion paper, CSIRO, Australia, Division of Exploration Geoscience, Perth. 29 p.
- Anand R., Smith R., Innes J., Churchward H., Perdrix J., Grunsky E. 1989. Laterite types and associated ferruginous materials, Yilgarn Block, WA: terminology, classification, and atlas. CSIRO Division of Exploration Geoscience Report 60R.
- Anand, R., Churchward, H., Smith, R., Smith, K., Gozzard, J., Craig, M., Munday, T. 1993. Classification and atlas of regolith-landform mapping units – exploration perspectives for the Yilgarn Craton. Csiro.
- Anand, R., Paine, M. 2002. Regolith geology of Yilgarn Craton, western Australia: Implication for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49, p. 3-162.
- Anand, R., Paine, M., Smith, R. 2002. Genesis, classification, and atlas of ferruginous materials, Yilgarn Craton. Csiro.
- Arhin, E., Nude, P. 2009. Significance of regolith mapping and its implication for gold exploration in northern Ghana: a case study at Tinga and Kunche. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 9, p. 63-69.
- Arhin, E., Jenkin, G., Cunningham, D., Nude, P. 2015. Regolith mapping of deeply weathered terrain in savannah regions of the Birimian Lawra Greenstone Belt, Ghana. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, p. 194-207.
- Assis, L., Francelino, M., Daher, M., Fernandes-Filho, E., Veloso, G., Gomes, L., Schaefer, C. 2021. Modeling regolith thickness in iron formations using machine learning techniques. *CATENA*, 207, 105629. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105629>.
- Augustin, C., Lopes, C., Silva, S. 2014. Lateritas: Um Conceito Ainda em Construção. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14, p. 241-257.
- Augustin, F. 2011. Mapping the Regolith and Its Mineralogy from The Tick Hill Region, Mt. Isa, Queensland using HyMap and ASTER Remote Sensing Data. (Tese Doutorado). Curtin University, Bentley. 186 p.
- Augustin, F. 2016. Regolith Landform Unit Mapping using Hyperspectral Images (Case study: Block G Tick Hill Mt. Isa, Australia). *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 17, p. 193-204.
- Augustin, F. 2017. ASTER Mineral Classification for Regolith Mapping in Tick Hill Mount Isa, Northwest Queensland. *Indonesian Journal on Geoscience*, 4, p. 97-109.
- Beauvais, A. 1999. Geochemical balance of lateritization processes and climatic signatures in weathering profiles overlain by ferricretes in Central Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, p. 3939-3957.
- Bonham-Carter, G. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford.
- Braun, O., Ramalho, R. 1979. Geomorfologia da Bahia. *Revista Bras. Geog.*, 42, p. 822-861.
- Brites, R., Soares, V., Ribeiro, C. 1996. Verificação da exatidão em classificações de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. *Revista Árvore*, 20, p. 415-424.
- Butt, C., Zeegers, H. 2015. *Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains*. Elsevier Science. 606p.
- Butt, C. 2004. Understanding the regolith in tropical and subtropical terrains: the key to exploration under cover. *SEG*, p. 74-78.

- Butt, C. 2016. The development of regolith exploration geochemistry in the tropics and subtropics. *Ore Geology Reviews*, 73, p. 380-393.
- Campos, J., Dardenne, M. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 2, p. 269-282.
- Campos, J., Dardenne, M., Freitas-Silva, F., Martins-Ferreira, M. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*, 43, p. 461-476.
- Campos-Neto M. 1984. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evolução paleogeográfica dos grupos Canastra e Paranoá (Vazante-Lagamar, MG). *Revista Bras. Geociências*, 14, p. 81-91.
- Carrino, T., Silva, A., Botelho, N., Silva, A. 2011. Discriminação de áreas de espesso regolito do leste do Estado do Amazonas usando estatística multivariada, algoritmo hiperespectral e modelagem de dados espaciais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29, p. 155-172.
- Caruso, A., Clarke, K., Tiddy, C., Delean, S., Lewis, M. 2018. Objective regolith-landform mapping in a regolith dominated terrain to inform mineral exploration. *Geosc.*, 8, p. 1-19.
- Carranza, E. 2009. *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier Science. 640p.
- Carvalho, M., Valeriano, C., González, P., Oliveira, G., Impicini, A. The thrust contact between the Canastra and Vazante groups in the Southern Brasília Belt: structural evolution, white mica crystallinity and implications for the Brasiliano orogeny. *Braz. Jour. of Geol.*, 46, p. 567-583.
- Castro, R., Horbe, A., Almeida, C. 2016. A crosta laterítica ferro-titanífera da Vila Nova Colina e a lateritização no sul de Roraima. *Acta Amazônica*, 46, p.47-60.
- Chevrel, S., De Boissieu, F., Sevin, B., Despinoy, M., Cudahy, T., Rodger, A., Laukamp, C. 2012. Mapping of the Regolith of New Caledonia with Airborne Hyperspectral Remote Sensing. *In: 1st EAGE/GRSG Remote Sensing Workshop* (pp. 305). European Association of Geoscientists & Engineers. Doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143283>.
- Chica-Olmo, M., Abarca, F., Rigol, J. 2002. Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 23, p. 4801-4814.
- Clark, R., Rencz, A. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Manual of remote sensing*, 3, p. 3-58.
- Cloutis, E. 1996. Review article hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 17, p. 2215-2242.
- Costa, M. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21, p. 146-160.
- Costa, M. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, 6, p. 79-104.
- Costa, M. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. *In: Otavio A.B. Licht, Carlos Siqueira Bandeira de Mello, Cassio Roberto da Silva (Eds.), Prospecção geoquímica-depósito minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica e Serviço Geológico do Brasil, p. 199-244.
- Cracknell, M., Reading, A., De Caritat, P. 2015. Multiple influences on regolith characteristics from continental-scale geophysical and mineralogical remote sensing data using Self-Organizing Maps. *Remote Sensing of Environment*, 165, p. 86-99.
- Craig, M., Wilford, J., Tapley, I. 1999. Regolith-landform mapping in the Gawler Craton – an alternative approach. *MESA Journal*, 12, p. 17-21.

- Crósta, A., Moore, J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. *Proc. 7th Themat. Conf. Remote Sens. Explor. Geol. Calgary*, p. 1173–1187.
- Crósta, A., Souza Filho, C., Azevedo, F., Brodie, C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24, p. 4233-4240.
- Cudahy, T., Caccetta, M., Thomas, M., Hewson, R., Abrams, M., Kato, M., Mitchell, R. 2016. Satellite-derived mineral mapping and monitoring of weathering, deposition, and erosion. *Scientific Reports*, 6, p. 1-12.
- Dardenne M. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. *In: Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, SBG*, 1, p. 299-308.
- Dardenne, M., Campos, J., Alvarenga, C., Martins, F., Botelho, N. 1999. A sequência sedimentar do Grupo Araí na região da Chapada dos Veadeiros, Goiás. *In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, p. 100.
- Dardenne, M. 2000. The Brasilia Fold Belt. *In: U.G Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). Tectonic Evolution of South America. 31 Inter. Geology Congress*, p. 231-263.
- Davari, M., Karimi, S., Bahrami, H., Hossaini, S., Fahmideh, S. 2021. Simultaneous prediction of several soil properties related to engineering uses based on laboratory Vis-NIR reflectance spectroscopy. *CATENA*, 197, p. 1-12.
- Dauth, C. 1997. Airborne magnetic, radiometric and satellite imagery for regolith mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. *Exploration Geophysics*, 28, p. 199-203.
- De Boissieu, F., Sevin, B., Cudahy, T., Mangeas, M., Chevrel, S., Ong, C., Despinoy, M. 2018. Regolith-geology mapping with support vector machine: A case study over weathered Ni-bearing peridotites, New Caledonia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, p. 377-385.
- Deller, M. 2006. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER, and ALI data—examples from Eritrea and Arabia. *Inter. Journal of Rem. Sens.*, 27, p. 2389-2409.
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32, p. 275-290.
- Du, X., Zhou, K., Cui, Y., Wang, J., Zhang, N., Sun, W. 2016. Application of fuzzy analytical hierarchy process (AHP) and prediction-area (P-A) plot for mineral prospectivity mapping: a case study from the Dananhu metallogenic belt, Xinjiang, NW China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, p. 2-15.
- Eggleton, R. 2001. *Glossary of Regolith—Surficial Geology, Soils and Landscapes*. CRC LEME Publication, Perth.
- El Desoky, H., Shahin, T., Abu El-Leil, I., Shafea, E. 2020. Geology and mapping of laterites, South-Eastern Desert, Egypt: Based on field and ASTER data approach. *Geological Journal*, 55, p. 4252-4264.
- Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. 1987. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, Embrapa-SNLCS, 455p.
- Espíndola, C., Daniel, L. 2008. Laterita e Solos Lateríticos no Brasil. *Boletim Técnico da FATECSP BT/24*, p. 21-24.

- Es-Sabbar, B., Essalhi, M., Essalhi, A., Mhamdi, H. 2020. Lithological and structural lineament mapping from Landsat 8 OLI images in Ras Kammouna arid area (Eastern Anti-Atlas, Morocco). *Economic and Environmental Geology*, 53, p. 425-440.
- Farooq, S., Govil, H. 2014. Mapping Regolith and Gossan for Mineral Exploration in the Eastern Kumaon Himalaya, India using Hyperion data and object-oriented image classification. *Advances in Space Research*, 53, p. 676-1685.
- Fitzgerald, R., Lees, B. 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 47, p.362-368.
- Fragoso, D., Uhlein, A., Sanglard, J., Suckau, G., Guerzoni, H., Faria, P. 2011. Geologia dos grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: registro deposicional do Neoproterozóico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, 19, p. 28-38.
- Fraser, A., Huggins, P., Rees, J., Cleverly, P. 1997. A satellite remote sensing technique for geological structure horizon mapping. *Inter. Journal of Rem. Sens.*, 18, p. 1607-1615.
- Fuck, R., Marini, O., Dardenne, M., Figueiredo, A. 1988. Coberturas metassedimentares do Proterozoico Médio: os grupos Araí e Paranoá na região de Niquelândia-Colinas, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 18, p. 54-62.
- Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Wang, F., Zhao, M., Ding, H. 2020. Assessment of the Capability of Sentinel-2 Imagery for Iron-Bearing Minerals Mapping: A Case Study in the Cuprite Area, Nevada. *Remote Sensing*, 12, p. 1-16.
- Gibson, P., Power, C., Keating, J. 2013. *Introductory remote sensing: Principles and concepts*. Routledge, 216p.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, p. 18-27.
- Grimaud, J., Chardon, D., Metelka, V., Beauvais, A., Bamba, O. 2015. Neogene cratonic erosion fluxes and landform evolution processes from regional regolith mapping (Burkina Faso, West Africa). *Geomorphology*, 241, p. 315-330.
- Goiás (Estado), Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. 2006. *Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal*. Goiânia, 128p.
- Harris, J., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M., Ayer, J., Dahn, R. 2001. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps—a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, 10, p. 91-124.
- Harris, J., Wickert, L., Lynds, T., Behnia, P., Rainbird, R., Grunsky, E., McGregor, R.; Schetselaar, E. 2011. Remote Predictive Mapping. *Optical Remote Sensing – A Review for Remote Predictive Geological Mapping in Northern Canada*. *Geosc. Canada*, 38, p. 49–83.
- Hartwig, M., Caboclo, F. 2012. Detection of lateritic deposits using TM Landsat images to support the Carajás railway duplication project, North and Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 30, p. 41-49.
- Horbe, A., Costa, M. 1999. Geochemical evolution of a lateritic Sn, Zr, Th, Nb, Y, REE- bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas-Brasil. *Journal of Geochemical Exploration*. v. 66. p. 339-351.

- Hunt, G., Salisbury, J. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, I. Silicate minerals. *Modern Geology*, 1, p. 283–300.
- Hunt, G. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42, p. 501-513.
- Hunt G., Ashley R. 1979 Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74, p. 1613–1629.
- Ibrahim, E., Barnabé, P., Ramanaidou, E., Pirard, E. 2018. Mapping mineral chemistry of a lateritic outcrop in New Caledonia through generalized regression using Sentinel-2 and field reflectance spectra. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, p. 653-665.
- Ishidoshiro, N.; Yamaguchi, Yasushi; Noda, S.; Asano, Y.; Kondo, T.; Kawakami, Y.; Mitsuishi, M.; Nakamura, H. 2016. Geological Mapping by Combining Spectral Unmixing and Cluster Analysis for Hyperspectral Data. *In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, p. 431-435.
- Iza, E., Horbe, A., Silva, A. 2016. Boolean and fuzzy methods for identifying lateritic regoliths in the Brazilian Amazon using gamma-ray spectrometric and topographic data. *Geoderma*, 269, p.27-38.
- Iza, E., Horbe, A., Castro, C., Herrera, I. 2018. Integration of geochemical and geophysical data to characterize and map lateritic regolith: an example in the Brazilian Amazon. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, p. 3254-3271.
- Jost, H., Carmelo, A., Menezes P. 1994. Litologias, Relação de Contato e Estrutura do Bloco Caiamar, Crixás- Goiás. *In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Boletim de Resumos Expandidos*, p. 18-20.
- Kruse, F., Perry, S. 2013. Mineral Mapping Using Simulated Worldview-3 Short-Wave-Infrared Imagery. *Remote Sensing*, 5, p. 2688–2703.
- Kusuma, K., Ramakrishnan, D., Pandalai, H. 2012. Spectral pathways for effective delineation of high-grade bauxites: a case study from the Savitri River Basin, Maharashtra, India, using EO-1 Hyperion data. *International Journal of Remote Sensing*, 33, p. 7273-7290.
- Lacerda Filho, J.V., Rezende, A., Silva, A., 1999. Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, escala 1:500000. Serviço Geológico do Brasil. Conv. CPRM/METAGO S.A./UnB).
- Landis, J.R., Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical
- Laffan, S., Lees, B. 2004. Predicting regolith properties using environmental correlation: a comparison of spatially global and spatially local approaches. *Geoderma*, 120, p. 241-258.
- Landis, J., Koch, G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, p.159–174.
- Langford, R. 2015. Temporal merging of remote sensing data to enhance spectral regolith, lithological and alteration patterns for regional mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 68, p. 14-29.
- Latrubesse M., Carvalho M. 2006. Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Secretaria de Indústria Comércio, Superintendência de geologia e mineração, Brasil, p. 1–127.
- Lau, I., Cudahy, T., Heinson, G., Mauger, A., James, P. 2003. Practical applications of hyperspectral remote sensing in regolith research. *Advances in Regolith*, p. 249-253.
- Loughlin, W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, p. 1163-1169.

- Ma, Z., Redmond, R. 1995. Tau coefficient for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 61, p. 435–439.
- Marques, G. 2009. Geologia dos grupos Araí e Serra da Mesa e seu embasamento no sul do Tocantins. (Dissertação Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília. 112p.
- Marques, C., Uhlein, A., Oliveira, G., Sial, A., Alvarenga, C. 2015. Geologia e quimioestratigrafia isotópica do grupo Vazante. *Revista Geonomos*. 23, p. 26-41.
- Martins, É. 2000. Petrografia, mineralogia e geomorfologia de regolitos lateríticos no Distrito Federal. (Tese Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília. 196p.
- Martins, É., Reatto, A., Carvalho Júnior, O., Guimarães, R. 2004. Evolução geomorfológica do Distrito Federal. *EMBRAPA Cerrados*, 57 p.
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A., Ghaderi, M. 2017. Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data. *Geosciences Journal*, 21, p. 137-148.
- McBratney, A., Odeh, I., Bishop, T., Dunbar, M., Shatar, T. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97, p. 293–327.
- Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M., Barth, A., Ježek, J., Naba, S. 2018. Automated regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data, Burkina Faso, West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 204, p. 964-978.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Asadi, H., Modabberi, S. 2008. Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, 29, p. 2851-2867.
- Nascimento, M. 1991. Geomorfologia do Estado de Goiás. *Boletim Goiano de Geografia*, 12, p. 1-22.
- Nascimento, R. 2011. Evolução de um perfil laterítico em domo estrutural de Sobradinho, Distrito Federal. (Tese Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 180p.
- Navarro, G., Zanardo, A., Conceição, F. 2013. O Grupo Araxá na Região Sul-Sudoeste do Estado de Goiás. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, 13, p. 5-28.
- Ourhizif, Z., Algouti, A., Haacht, F. 2019. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla district south high atlas of Marrakech. *Inter. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42, p. 1255-1262.
- Pain, C., Craig, M., Gibson, D. L., Wilford, J. 2001. Regolith-landform mapping: an Australian approach. *In: Geoenvironmental mapping, method, theory, and practice*. AA Balkema, Swets and Zeitlinger Publishers, p. 29-56.
- Papp, E., Cudahy, T. 2002. Hyperspectral remote sensing. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, 144, p. 13-21.
- Peixoto, S., Horbe, A., Soares, T., Freitas, C., de Sousa, E., Figueiredo Iza, E. 2021. Boolean and fuzzy logic operators and multivariate linear regression applied to airborne gamma-ray spectrometry data for regolith mapping in granite-greenstone terrain in Midwest Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, p. 1-14.
- Pereira, L. 1992. Relações Tectono-Estratigráficas entre as unidades Canastra e Ibiá na região de Cromandel e Guarda-Mor, MG. (Dissertação Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília. 73p.
- Pereira, L., Dardenne, M., Rosière, C., Pedrosa-Soares, A. 1994. Evolução geológica dos grupos Canastra e Ibiá na região entre Coromandel e Guarda-Mor, MG. *Geonomos*, 2, p. 22-32.

- Porwal, A., Carranza, E., Hale, M. 2006. A Hybrid Fuzzy Weights-of-Evidence Model for Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research*, 15, p. 1–14.
- Pour, A., Hashim, M. 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *J. Asian Earth Sci*, 42, p. 1309–1323.
- Pour, A., Hashim, M. 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore geology reviews*, 44, p. 1-9.
- Pour, A. B., Hashim, M. 2014. Alteration mineral mapping using ETM+ and Hyperion remote sensing data at Bau Gold Field, Sarawak, Malaysia. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 012149.
- Pour, A., Hashim, M., Park, Y., Hong, J. 2018. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data. *Geocarto International*, 33, p.1281-1306.
- Pour, A., Park, T., Park, Y., Hong, J., Zoheir, B., Pradhan, B., Hashim, M. 2018. Application of multi-sensor satellite data for exploration of Zn–Pb sulfide mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland. *Remote Sensing*, 10, p. 1186.
- Pour, A., Zoheir, B., Pradhan, B., Hashim, M. 2021. Editorial for the Special Issue: Multispectral and hyperspectral remote sensing data for mineral exploration and environmental monitoring of mined areas. *Remote Sensing*, 13, 519. Doi: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-1265-5>.
- Reis, C. 2013. *Geologia, Sistemas Depositionais e Estratigrafia Isotópica do Grupo Bambuí na Região de Santa Maria da Vitória, BA. 2013. (Dissertação Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília. 97p.*
- Retallack, G. 2010. Lateritization and bauxitization events. *Economic Geology*, 105, p. 655–667.
- Rockwell, B., Hofstra, A. 2008. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data-Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 4, p.218-246.
- Rodrigues, J. 2008. *Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí - Um estudo de zircões detríticos e Idades modelo Sm-Nd. (Tese Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília. 141p.*
- Romão, P., Dias, R., Borges, R. 2004. *Geomorfologia da Folha SB.22-Z-D. Estado do Tocantins. Escala 1:250.000. Zoneamento Ecológico-Econômico. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente (Seplan), Palmas, Seplan/DEZ. 60p.*
- Rousse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. NASA SP-351*, p. 301-317.
- Sabaraense, L. 2016. *Proveniência dos grupos Araxá e Ibiá na porção sul da Faixa Brasília. (Dissertação Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília. 100p.*
- Sabins, F. 1999. Remote Sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, p. 157-183.
- Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P. 2014. Discrimination of iron high potential zones at the zaghia iron ore deposit, Bafq, using index overlay GIS method. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 6, p. 91-98.
- Saibi, H., Bersi, M., Mia, M., Saadi, N., Al Bloushi, K., Avakian, R. 2018. Applications of remote sensing in geoscience. *Recent Advances and Applications in Remote Sensing*, 181 p.
- Sawadogo, B., Bamba, O., Chardon, D. 2020. Landform-regolith mapping in the West African context. *Ore Geology Reviews*, 126. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103782>.

- Scott, K., Pain, C. 2009. *Regolith Science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 462p.
- Sekandari, M., Masoumi, I., Pour, A., Muslim, A., Rahmani, O., Hashim, M., Aminpour, S. 2020. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER, and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT). *Remote Sensing*, 12, 1239. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs12081239>.
- Sgarbi, G. Arenitos eólicos da Formação Areado (Bacia Cretácea do São Francisco): Caracterização, diagênese e aspectos químicos. *Rev. Bras. de Geociências*, 21, p. 342-354.
- Shahriari, H., Ranjbar, H.; Honarmand, M. 2013. Image Segmentation for Hydrothermal Alteration Mapping Using PCA and Concentration–Area Fractal Model. *Natural Resources Research*, 22, p. 191–206.
- Sheikhrhimi, A., Pour, A., Pradhan, B., Zoheir, B. 2019. Mapping hydrothermal alteration zones and lineaments associated with orogenic gold mineralization using ASTER data: A case study from the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Advances in Space Research*, 63, p.3315-3332.
- Sherman, D., Waite, T. 1985. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. *American Mineralogist*, 70, p. 1262-1269.
- Shirazi, A., Shirazy, A., Karami, J. 2018. Remote sensing to identify copper alterations and promising regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 4, p. 36-52.
- Soe, M., Won-In, K., Takashima, I., Charusiri, P. 2008. Lateritic soil mapping of the Phrae basin, northern Thailand using satellite data. *Science Asia*, 34, p.307-316.
- Sotero, M., Caxito, F., Dias, P., Sotero, B. 2019. Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais. *Revista do Instituto de Geociências - USP*, 19, p. 195-214.
- Souza, M., Horbe, A., Silva, B., Peixoto, S., Castro, R. 2021. Regolith LANDSAT-8/OLI and Hyperion/EO-1 images classification in Midwest of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, p. 1-14.
- Strens, R., Wood, B. 1979. Diffuse reflectance spectra and optical properties of some iron and titanium oxides and oxyhydroxides. *Mineralogical Magazine*, 43, p. 347-354.
- Swayze, G., Clark, R. 1995. Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the Tricorder algorithm. *In: Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publ. 95-1. R. O. Green. Jet Propulsion. Lab., Pasadena, California. p. 157– 158.
- Tapley, I., Gozzard, J. 1992. Regolith-landform mapping in the Lawlers District. Report 1: Aerial photographic interpretation and Landsatt Thematic Mapper processing for mapping regolith-landforms. CSIRO Australia Division of Exploration and Mining, Perth. Report 239R CSIRO/AMIRA Project P243.
- Tardy, Y., Roquin, C. 2000. Derive des continents, Paléoclimats et altérations tropicales. *In: Bulletin de l'Association de géographes français*. p. 373-383.
- Tripathi, M., Govil, H. 2020. Regolith mapping and geochemistry of hydrothermally altered, weathered and clay minerals, Western Jahajpur belt, Bhilwara, India. *Geocarto Inter.*, p. 1-17.
- Valeriano, C., Dardenne, M., Fonseca, M., Simões, L., Seer, H. 2004. A evolução tectônica da Faixa Brasília. *In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução e obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p.575-593.

- van der Meer, F., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Hecker, C., Bakker, W.; Noomen, M., van der Meijde, M., Carranza, J., de Smeth, J., Woldai, T. 2012. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, p.112-128.
- van der Werff, H., van der Meer, F. 2015. Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote Sensing*, 7, p. 12635-12653.
- van der Werff, H., van der Meer, F. 2016. Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote sensing*, 8, p. 1-16.
- Wilford, J., Creasey, J. 2002. Landsat thematic mapper. *In: Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration*, p. 6-12.
- Wilford, J., Thomas, M. 2013. Predicting regolith thickness in the complex weathering setting of the central Mt Lofty Ranges, South Australia. *Geoderma*, 206, p. 1-13.
- Wilford, J. 2014. New regolith mapping approaches for old Australian landscapes. (Tese Doutorado). University of Adelaide, Adelaide. 183p.
- Yousefi, T., Aliyari, F., Abedini, A., Calagari, A. 2018. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, p. 1-19.